



BIOMASSA RESIDUAL BRASILEIRA
MODELAGEM DE UMA BASE DE DADOS RELACIONAL
EM FUNÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Marco Cristellotti

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Rio de Janeiro

Junho de 2017

BIOMASSA RESIDUAL BRASILEIRA
MODELAGEM DE UMA BASE DE DADOS RELACIONAL
EM FUNÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Marco Cristellotti

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Carlos Alberto Nunes Cosenza D.Sc.

Prof. Francisco Antônio de Moraes Accioli Doria D.Sc.

Prof. Mario Cesar Rodríguez Vidal Dr. Ing.

Prof. Cristina Gomes de Souza D.Sc.

Prof. Rafael Garcia Barbastefano D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2017

Cristellotti, Marco

Biomassa residual brasileira: modelagem de uma Base de Dados Relacional em função da produção de biogás/
Marco Cristellotti. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 109 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 98-107.

1.Biomassa residual. 2. Base de dados. 3.Biodigestão anaeróbia. I. Cosenza, Carlos Alberto Nunes II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ter me proporcionado saúde e colocado no meu caminho as pessoas sem as quais esse trabalho não poderia ter sido realizado. A Jesus, que tem nos religado a Ele após um grande afastamento. Aos meus pais, Maria e Gilberto, a minhas filhas Marcele e Magda Luna e à mãe delas, Cláudia. À Débora, minha noiva. Ao Prof. Cosenza, meu orientador. Ao Getúlio, pelas dicas e conselhos, aos colegas e outros docentes e a todos os operadores desse universo dos resíduos, na pesquisa e no campo, que juntos criaram as condições para que isso pudesse ser pensado. Finalmente ao André, que me ajudou em me orientar no campo da programação e conhecimento informático das bases de dados, fundamental para que essa modelagem que constitui a tese e o relativo protótipo pudessem surgir e serem colocados no ar.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

BIOMASSA RESIDUAL BRASILEIRA:
MODELAGEM DE UMA BASE DE DADOS RELACIONAL EM FUNÇÃO DA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Marco Cristellotti

Junho/2017

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Programa: Engenharia de Produção

Este trabalho apresenta uma proposta metodológico-experimental de modelagem de uma base de dados (BD) relacional, com vistas ao cadastro e consulta de resíduos orgânicos (biomassas residuais), com potencial de produção de biogás. A proposta envolve uma pesquisa sobre as formas de categorizar e tipificar as várias fontes geradoras de resíduos orgânicos geradas no Brasil, juntamente a um trabalho de análise de software, com foco na definição do sistema gerenciador da base de dados (SGBD) e interface com o usuário, visando a proporcionar as duas funções intrínsecas a uma BD: o cadastro e a consulta de dados por usuários e administradores do sistema. Na base de dados modelada, o usuário poderá cadastrar dados analíticos sobre produção e disponibilidade localizadas de resíduos de interesse desse processo assim como consultar dados localizados com sistema georeferenciado, além de dados estatísticos sobre a produção brasileira. O administrador carregará dados estatísticos elaborados a partir de fontes oficiais e filtrará manualmente os dados localizados alimentados pelos usuários quando estes excederem determinados parâmetros de plausibilidade. A proposta define-se como uma contribuição para viabilidade de projetos de biodigestão anaeróbia, que pode contribuir bastante para a solução do problema do destino sustentável da fração orgânica dos resíduos sólidos, que constitui, entre outros, 50% dos resíduos sólidos urbanos. Um protótipo experimental do modelo real encontra-se disponível no link: <http://162.216.155.68:82/biomassa.aspx>.

Abstract of Theses presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

BRAZILIAN BIOMASS RESIDUES
MODELLING OF A RELATIONAL DATABASE
DEDICATED TO ANAEROBIC BIODIGESTION

Marco Cristellotti

June 2017

Advisor: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Department: Production Engineering

This work puts forward a methodological-experimental modeling for a relational database customized for anaerobic biodigestion and biogas production. Following the work of categorizing all residues and wastes, a model of software analysis is proposed, along with a database management system (DBMS) and users interface, taking into account two main functions: one of consulting and another of loading information by users and by the administrators of the system. This way, users will be enabled to load in the database analytical data concerning the production and availability of residues liable of being processed through anaerobic biodigestion; on the other side, users will be able to consult statistical and spotted information loaded in the system by other users and by administrators, upon the same subject. Administrators will elaborate statistical data to facilitate the access for users, starting from information mined from official sources. Another task of administrators will be to filter manually spotted data, during the loading process by users, when these data exceed certain plausibility parameters determined category by category. This way, the proposal contributes to viability studies for industrial scale biogas production plants, considering that anaerobic biodigestion can contribute definitely for sustainability of final destination of the organic fraction of all types of waste in Brazil. A prototype of this model, for testing and experimental purposes, is available at: <http://162.216.155.68:82/biomassa.aspx>.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE QUADROS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Resumo executivo e metodologia	1
1.2 Conceito e definições de biomassa	2
1.3 Contextualização temática	5
1.4 Biodigestão Aneróbia: saneamento, energia e carbono	13
1.5 Identificação do problema e prognóstico sobre biogás.....	17
1.6 Objetivo da tese e justificativas	27
2. POLÍTICAS PÚBLICAS, LEGISLAÇÃO, MARCOS REGULATÓRIOS.....	30
3. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA E RESÍDUOS ORGÂNICOS	37
3.1 Descrição geral da tecnologia.....	37
3.2 Substratos do processo: resíduos orgânicos e biomassa residual	43
3.3 Eficiência comparada da biodigestão anaeróbia.....	51
3.4 Difusão da biodigestão anaeróbia em países desenvolvidos	57
3.5 Difusão da biodigestão anaeróbia no Brasil	61
4. OUTRAS ROTAS E TECNOLOGIAS PARA BIOMASSA	64
4.1 Combustão ou Queima direta	65
4.2 Pirólise.....	69
4.3 Gaseificação.....	74
5. MODELAGEM DA BASE DE DADOS	82
5.1 Análise do software	82
5.2 Tipificação de resíduos.....	84
5.3 Dados estatísticos e dados pontuais.....	87
6. O MODELO REAL DA BASE DE DADOS RELACIONAL PROPOSTA.....	88
6.1 Sistema de cadastro	89
6.2 Sistema de consulta	92
6.3 Motivação para cadastro de usuários e consultas	93
6.4 Sistema de atualização da base de dados.....	94
7. CONCLUSÃO.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXO	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária Ambiental
AGRIAMBI – Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABIOGAS – Associação Brasileira de Biogás e de Biometano
ABBM – Associação Brasileira de Biogás e Metano
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABLP – Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ABISOLO – Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal

B

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento
BECCS – Bio-Energy Carbon Capture and Storage

C

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CENBIO/IEE/USP – Centro Nacional de Referência em Biomassa
CIESP – Centro das Indústrias do Estado de São Paulo
CETESB – Companhia Ambiental do estado de São Paulo
CBRO/INCAPER – Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos

COMGAS – Companhia de Gás de São Paulo
CNI – Confederação Nacional de Indústria
CIB – Consorzio Italiano Biogas e Gassificazione
COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia
CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CIBIOGAS – Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa
CCS – Carbon Capture and Storage

D

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio

E

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EBA – European Biogas Association
ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

F

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
FGV – Fundação Getúlio Vargas
FIRJAN – Federação da Indústria do Estado do Rio de Janeiro
FIESP – Federação da Indústria do Estado de São Paulo

G

GEE – Gases de Efeito Estufa

GNV – Gás Natural Veicular

H

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

I

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética

IWWG – International Waste Working Group

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

IEA – International Energy Agency

IRENA – International Renewable Energy Agency

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

L

LI – Licença Instalação

LO – Licença de Operação

LP – Licença Prévia

M

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MME – Ministério de Minas e Energia

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

N

NBR- Norma Brasileira Regulamentadora

O

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

P

PNRS

PLANSAB

Q

$Q_{\text{biogás}}$ – Vazão de Biogás

R

REDISIA – Red Iberoamericana en Gestion e Aprovechamento de Residuos

S

SBC/SBBD – Simpósio Brasileiro de Banco de Dados

T

TDH - Tempo de Detenção Hidráulica

TMB - Tratamento Mecânico Biológico

U

UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar

V

V_R – Volume Útil do Reator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Reservas mundiais de petróleo	4
Figura 2	- Blackout na área metropolitana de Nova Iorque	6
Figura 3	- Transição global de fontes energéticas	10
Figura 4	- Fotossíntese	12
Figura 5	- Fontes e destinos de biomassas	13
Figura 6	- Rotas de aproveitamento da biomassa	13
Figura 7	- Matriz energética brasileira	18
Figura 8	- Matriz energética brasileira	18
Figura 9	- Geração elétrica renovável na Alemanha	25
Figura 10	- Estimativa do potencial elétrico brasileiro com biogás	27
Figura 11	- Bioquímica da produção do biogás	38
Figura 12	- Bioquímica da produção do biogás	39
Figura 13	- Usina de biogás	40
Figura 14	- Usina de biogás	40
Figura 15	- Layout de usina <i>dry digestion</i>	41
Figura 16	- Layout de usina <i>dry digestion</i>	41
Figura 17	- Usina com rede elétrica geração distribuída	48
Figura 18	- Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa	52
Figura 19	- Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa	53
Figura 20	- Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa	53
Figura 21	- Comparação entre biogás e outros combustíveis	56
Figura 22	- Usinas de biogás nos EUA	60
Figura 23	- Difusão do biogás no Brasil	62
Figura 24	- Produção de biogás no Brasil	62
Figura 25	- Incidência da biomassa na matriz elétrica brasileira	67
Figura 26	- Pirólise artesanal de biomassa	70
Figura 27	- Usina de pirólise nos EUA	73
Figura 28	- Produtos da gaseificação de biomassa	75
Figura 29	- Usos do syngas	78
Figura 30	- Usina de gaseificação de biomassa no Brasil	81

Figura 31	- Modelo Relacional da Base de Dados	89
Figura 32	- Wireframe do formulário de cadastro	91
Figura 33	- Wireframe proposto para formulário de consulta	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Investimentos em energias renováveis	10
Tabela 2	- Potencial elétrico do biogás no Brasil	21
Tabela 3	- Produção de bioeletricidade na Itália	26
Tabela 4	- Potencial de geração elétrica com biogás	33
Tabela 5	- Potencial em biogás esgoto e lodos	46
Tabela 6	- Estimativa do potencial de biogás	47
Tabela 7	- Estimativa do potencial de biogás	47
Tabela 8	- Projetos MDL em curso no Brasil	63
Tabela 9	- Composição do syngas	76
Tabela 10	- Syngas em função do gaseificador	76
Tabela 11	- Syngas em função do gaseificador	77
Tabela 12	- Aplicações do syngas à geração elétrica	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Cenários de redução CO ₂	15
Gráfico 2	- Bioeletricidade de biogás	21
Gráfico 3	- Biodigestão de FORSU na Europa	22
Gráfico 4	- Biodigestão de FORSU na Europa	23
Gráfico 5	- Capacidade elétrica instalada com biogás na Europa	58
Gráfico 6	- Evolução do biogás na Europa 2010-2014	58
Gráfico 7	- Difusão de <i>biogas upgrading</i> na Europa	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Leis e Normas relacionadas ao biogás	36
Quadro 2	- Plantas de gaseificação de biomassa na Itália	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 Resumo executivo e metodologia

O trabalho apresenta primeiramente, nessa parte introdutiva, uma contextualização do problema tratado, além de uma definição dos conceitos de biomassa em geral, biomassa tradicional e biomassa moderna, em função de duas vertentes: o aproveitamento energético e o saneamento ambiental. Principal interesse é focar aqui no papel da biomassa moderna no mundo no Brasil, com suas potencialidades de desenvolvimento futuro, com foco específico na rota da biodigestão anaeróbia. Logo em seguida na introdução tentamos uma identificação do problema e definimos os objetivos e justificativas da tese.

No Cap. 2 nos concentramos nas diretrizes governamentais e no arcabouço legislativo atual, que constituem o contexto legal no qual qualquer uso da biomassa moderna no Brasil se insere.

No Cap. 3 é apresentada a tecnologia da biodigestão anaeróbia conforme o estado da arte atual. Encontram-se aqui informações sobre a tecnologia, suas variáveis e aplicações, como também sobre o grau de desenvolvimento alcançado nos países industrializados e no Brasil.

No Cap.4 avaliamos as tecnologias alternativas e/ou complementares à biodigestão anaeróbia, em quanto rotas possíveis para projetos de transformação e disposição da biomassa residual. Colocamos aqui também uma tentativa de comparação entre as alternativas, em termos de eficiência.

No Cap. 5 abordamos a questão central dessa tese, a modelagem de uma Base de Dados Relacional como casa de todas as informações disponíveis no território nacional, e os critérios para coleta e elaboração desses dados, tanto como sistema de imput quanto de consulta. Para isso os critérios de compatibilidade com os sistemas classificatórios e de coleta de informações existentes, tanto dos órgãos competentes como das unidades de pesquisa, têm sido mantidos como prioritários. Além disso a consideração sobre a questão da atualização e da viabilidade da coleta dos dados, além de uma dupla entrada em termo de macrodados e dados localizados.

No Cap. 6. O modelo é apresentado em todos seus desdobramentos lógicos, de representação gráfica, sistemas de cadastro, consulta e atualização de dados. Aspectos

motivacionais também são considerados em função da alimentação da Base de Dados pelos usuários.

No Cap. 7 algumas conclusões e propostas para futuros desenvolvimentos são apresentadas.

1.2 Conceito e definições de biomassa

O conceito de biomassa surgiu por volta de 1920, no âmbito dos estudos de geoquímica do cientista russo V.I. Vernadskij (VERNADSKI V.I.,1997) O objetivo desses estudos era a avaliação da massa dos seres vivos no planeta terra. Já o termo biomassa foi introduzido pelo zoólogo alemão R. Demoll, na mesma época. Com este termo R. Demoll (DEMOLL, 1927) definiu como biomassa a quantidade de substância constituída por seres vivos dentro de uma determinada unidade de volume ou superfície. Essa definição nos aproxima mais de uma utilidade prática em vista de alguma aplicação. Dentro de uma abordagem ecológica essas definições continuam válidas na atualidade.

Todavia só com os estudos do biólogo marinho russo V. G. Bogorov nos aproximamos mais de uma definição funcional para fins energéticos, de disposição e de transformação. Pois Bogorov introduziu o conceito de biomassa seca, portanto do conteúdo de água, que abre o caminho para a caracterização de cada biomassa específica e tangente tanto o conceito de biodegradabilidade quanto as várias possibilidades de emprego e transformação pelas rotas que veremos a seguir. Após uma secagem de amostras de organismos marinhos, obtida por meio de cloreto de cálcio (CaCl_2), Bogorov chegou à definição de biomassa como massa a seco de todos os indivíduos de uma determinada população viva. Uma definição rigorosa deve incluir no termo biomassa também o petróleo, o carvão e um derivado como o gás natural. Todavia, por se tratar de biomassas fósseis, ou seja, ter se gerado por via de eventos biológicos e geológicos antigos e não renováveis, estão em fase de exaustão. O que as diferencia das biomassas como as entendemos nesse contexto é:

1. O *tempo* que se passou da morte dos seres vivos, animais ou vegetais, que as compõem.
2. A impossibilidade das reservas fósseis se renovarem, devido às mudadas condições biológicas, zoológicas, vegetais e geológicas da terra, sendo elas oriundas de populações e processos não mais atuais.

3. O balanço negativo em termos de emissões de gases de efeito estufa (CO₂ e equivalentes) que caracteriza o uso energético e de transformação das biomassas fósseis, contrariamente ao mesmo uso com biomassas renováveis (ciclo do carbono positivo).

Com isso, apesar de os combustíveis fósseis serem *biomassas*, eles se contrapõem, em termos de estratégia de sustentabilidade, ao uso da biomassa renovável para fins energéticos, de disposição e de transformação.

Chegamos dessa forma ao conceito de biomassa adotado nesse trabalho, que abrange tanto o ponto de vista energético quanto o da disposição, ou seja:

Conjuntos de seres vivos inteiros, porções ou resíduos deles, vegetais ou animais, que tenham morrido recentemente, em diferentes estágios de hidrólise e/ou decomposição e/ou fermentação, em natura ou armazenados em função dos diferentes destinos de uso ou disposição

Já os dados mais analíticos, como a porcentagem de água contida nas biomassas, seu conteúdo de substância seca, matéria orgânica e carbono, etc., entram como detalhamentos dessa definição, em vista da relevância dessas variáveis sobre os possíveis destinos de disposição, aproveitamento energético e transformação.

Quanto à natureza da biomassa aqui considerada, é relevante notar como ela seja oriunda de um processo de primordial importância para vida no planeta terra, a fotossíntese, que é uma forma de armazenamento e transformação da energia solar e está na base da renovação vegetal e da cadeia alimentar do planeta. A matéria orgânica se sintetiza no encontro da energia solar com elementos como carbono, oxigênio e hidrogênio, conforme a seguinte fórmula sintética ilustrada na Figura 4:

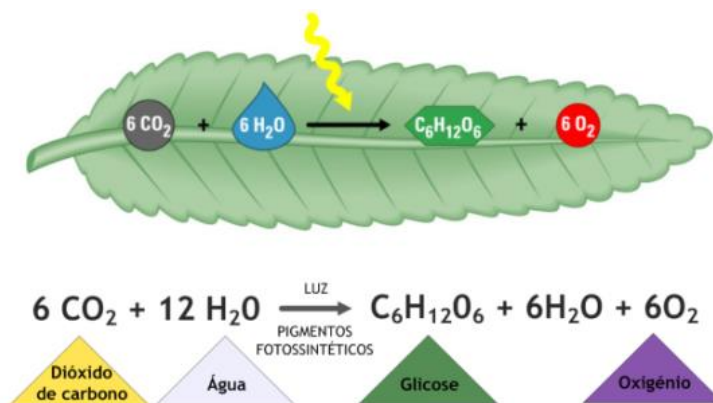


Fig. 4 - Fotossíntese – Fonte Dias Magalhães, 2017

A biomassa de origem animal aqui considerada está também atrelada a esse processo básico, estando os vegetais na base da cadeia alimentar de todos os seres do reino animal. Com isso podemos afirmar que a energia contida na biomassa é de fato energia solar armazenada. Veremos, nas seções dedicadas às várias tecnologias de transformação e aproveitamento energético, como esse processo está na base de todas as sucessivas reações termoquímicas e bioquímicas envolvidas nas diferentes rotas tecnológicas. Dito isto em prol de uma definição geral, constatamos que uma maior utilidade de um ponto de vista engenharístico virá de uma segmentação das definições e das categorias das biomassas, em termos de origem, caracterização e parâmetros funcionais à rota tecnológica escolhida (Biodigestão Anaeróbia ou outras). Em vista dessa segmentação as Figuras 5 e 6 mostram um apanhado das fontes de biomassa disponíveis a serem classificadas e dos possíveis destinos:

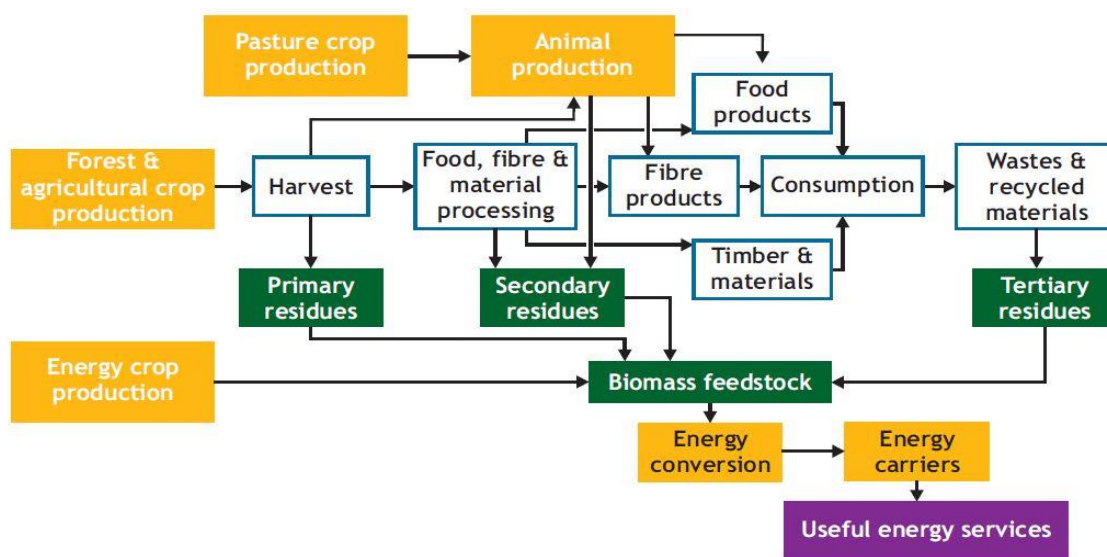


Fig. 5 - Fontes e destinos de biomassas - Fonte IEA, 2007

Nessa classificação das fontes de produção de biomassa são incluídos, além dos cultivos energéticos que não serão considerados no presente trabalho, resíduos da agricultura (colheitas, etc.), agropecuária, indústria alimentícia, indústria de transformação de fibras e materiais, indústria madeireira e dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

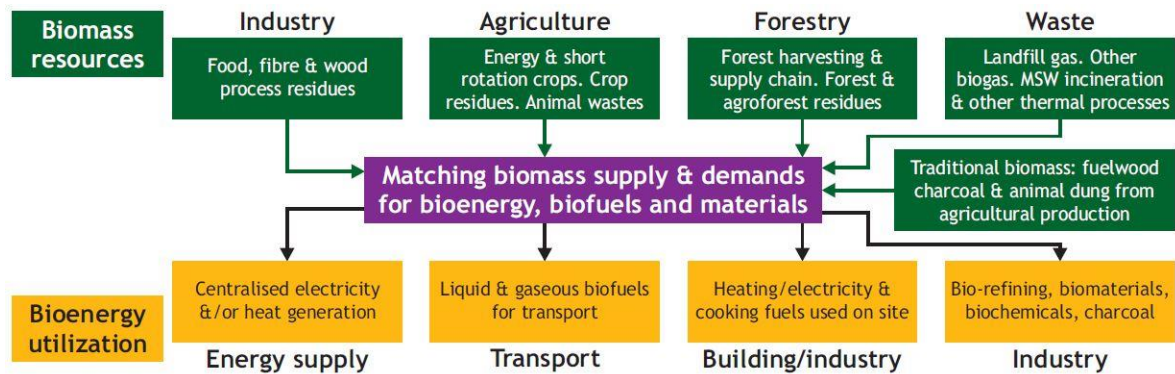


Fig. 6 – Rotas de aproveitamento da biomassa, Fonte IEA, 2007

Já as rotas de aproveitamento e transformação da biomassa residual, entre as quais se insere a Biodigestão Anaeróbia, aqui considerada, são sintetizadas na Figura 6. Nessa figura também é colocado no centro o conceito básico para que as avaliações do potencial da biomassa residual se concretizem em boas práticas de sustentabilidade, a dizer: propiciar o encontro da oferta de biomassa com a demanda por bioenergia, biocombustíveis e materiais.

1.3 Contextualização temática

A tendência conceitual para uma redução do uso de fontes de energia de origem fóssil já se estabeleceu a nível mundial, apesar de carvão, petróleo e gás natural constituir ainda a base firme das matrizes energéticas primárias e secundárias da maioria dos países industrializados; apesar, também, do petróleo estar na base da cadeia produtiva de inúmeros produtos e materiais, principalmente plásticos. Independentemente do tempo que será necessário para que esse conceito se concretize em boas práticas, a semente está lançada em terra fértil, uma terra que se constitui por quatro componentes básicas:

- a. Redução da dependência mundial de países produtores de petróleo e consequente redução de conflitos bélicos ligados ao controle das jazidas e oleodutos.
- b. Caráter não sustentável, no setor energético, de práticas meramente extrativistas como a retirada de petróleo e carvão, similares às do homem em estágios primitivos de desenvolvimento (caçador/coletor), com a agravante que os recursos fósseis não se regeneram. Necessidade, portanto, de fontes renováveis de energia.
- c. Impactos climáticos ameaçadores ligados às emissões de combustíveis fósseis (GEE – Gases de Efeito Estufa) e necessidade reduzir as emissões como também retirar parte

do carbono presente na atmosfera para estocá-lo de volta no solo (CCS—Carbon Capture and Sequestration) (FAO/GOVERNO da FRANÇA, 2016a);

- d. Erosão, perda do estoque de carbono e de fertilidade dos solos, desertificação e salinização, ligados ao uso de fertilizantes de origem fóssil e ao uso intensivo de combustíveis fósseis na agricultura. Esse aspecto está ligado ao item c, na medida em que o sequestro e estocagem de carbono no solo, ao promover a fertilidade, tem recaída sobre a redução das emissões de GEE (HANSEN et Al. 2008; KONINGSTEIN, FORK, 2014).

Vendo as implicações e desdobramentos dos itens acima, nos damos conta de quanto da vida, da economia e da cultura material das sociedades pós-industriais, assim como as dos países pobres ou em desenvolvimento, gira em torno da extração de petróleo e gás das profundezas da terra e do mar. Também de quão árdua será e longa, porém inevitável, essa transição energética, um caminho de volta para fontes renováveis, disponíveis na superfície do planeta.

Esse movimento em prol da produção de energia por fontes renováveis iniciou-se nos anos '70 do século passado, concomitantemente com as duas grandes crises energéticas e as elevações do preço do barril de petróleo em 1973 e 1979. Uma ressaca do boom econômico dos anos '60, alavancado pelo baixíssimo preço do barril de petróleo, que chegou até os dois dólares americanos. Apesar da elevação do preço do barril do petróleo ter claramente sugerido o recurso a energias renováveis, como o biodiesel, bioetanol, biogás/biometano, fotovoltaico e eólico, há controvérsias na avaliação do impacto do preço do petróleo sobre essas escolhas e sobre a economia em geral, em termos de recessão ou crescimento. Por um lado, a forte oscilação no valor do barril pode estar desvinculada de uma simples Lei da Demanda e da Oferta, dependendo de questões geopolíticas envolvendo frequentemente guerras, como, por exemplo, o conflito entre Israel e Egito no shock do petróleo de '73 (PALMER, COLTON, 2014). Por outro prisma de observação, mais ligado à Lei da Demanda e da Oferta, estando a economia global fortemente ligada ao uso dos combustíveis fósseis, um aumento no valor do barril pode desencadear uma redução na demanda, refletindo numa redução da produção e do crescimento econômico. Com isso uma consequente resposta de recessão e de redução de preço é de se esperar. (BARSKY, KILIAN, 2004).

Mais ainda, recentemente tem se notado nos EUA um fenômeno inverso de declividade positiva entre as duas variáveis, onde uma queda no valor do barril tem tido evidente correlação com uma recessão econômica (HAMILTON, 2016). É fato também, pelo inverso, que o petróleo barato tem alavancado o boom econômico dos anos sessenta, assim como a disparada de seu preço tem determinado as grandes crises energéticas e econômicas dos anos setenta do século passado.

Essas indefinições sobre o real efeito do preço do petróleo na economia (micro e macro) enseja uma reflexão de grande porte: podemos aqui somente registrar a impressão de que o valor de mercado do petróleo, assim como, analogamente, a taxa de juros, sejam operações que se furtam a um estudo simplesmente técnico, econômico ou científico, ingressando de fato o campo político e estratégico com seus relativos atores e competências, tanto em nível nacional como internacional. Nesse âmbito fica também a sugestão de que, para um país, não seja saudável contar tanto assim nessa fonte, não só por motivos ambientais e de sustentabilidade, mas também econômicos e geopolíticos. Mais modestamente, a lição que podemos tirar dessas incertezas é que, independentemente de questões ecológicas, também do ponto de vista econômico não deveria ser o mero valor de mercado e disponibilidade do barril de petróleo que norteia as considerações estratégicas dos governos no campo da energia e dos combustíveis fósseis, esteja ele seguindo ou contradizendo a costumeira Lei da Demanda e da Oferta, mais sim considerações estratégicas globais, assim como questões de soberania nacional e índice de desenvolvimento de um país, fortemente ligadas, entre outros fatores, a uma maior segurança e confiabilidade das matrizes energéticas e ao acesso à energia elétrica. Uma segurança e acessibilidade que pode ser implementada pela valorização de recursos energéticos distribuídos e pela diferenciação das fontes e localização da produção, em analogia com a dica clássica dos consultores financeiros que, cautelosamente, sugerem investimentos distribuídos em várias cestas, numa estratégia de risco calculado.

A questão da estimativa sobre a duração das reservas de petróleo no mundo não consegue nos dar um norte certo, por não ser simples e depender da incógnita relativa à

descoberta de novas jazidas. Previsões mais alarmistas, com base nas reservas atuais, falam em 40 anos, enquanto fontes mais confiáveis, como as da IEA, (IEA, 2013) apontam para um período entre 100 e 150 anos, conforme a Figura 1. De qualquer forma, olhando para as próximas gerações, algo a ser avaliado.

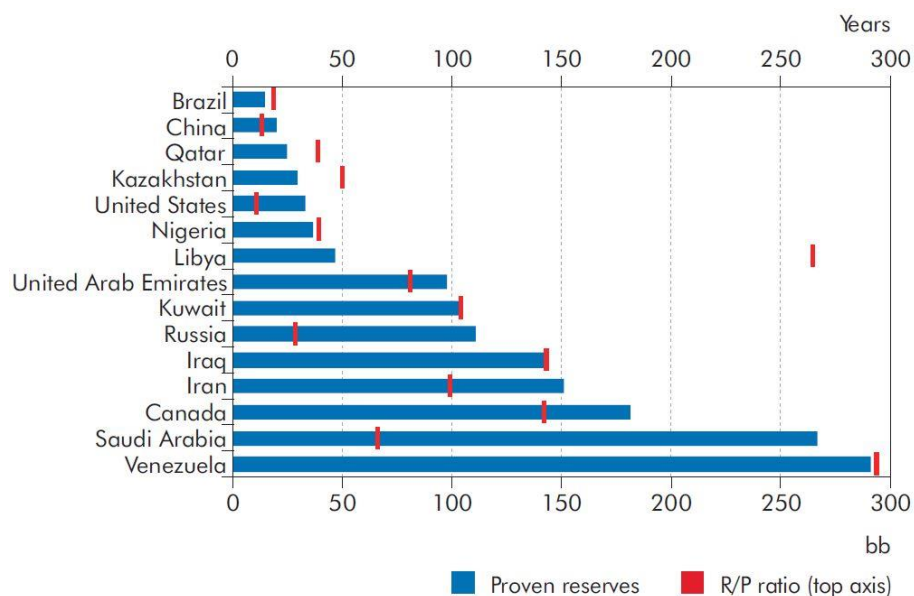


Fig. 1 - Reservas mundiais de petróleo - Fonte IEA, 2013

É claro que, perante os argumentos apresentados acima, como também uma abordagem estratégica que leve em conta a sustentabilidade de um modelo econômico de produção e de vida, não precisamos esperar para ver quando realmente as reservas de petróleo se esgotarão, quanto o aquecimento global subirá, ou quando haverá a próxima crise do petróleo. O desafio que já está lançado, inclusive para as grandes companhias petrolíferas e de geração/transmissão elétrica, é a conversão parcial das fontes energéticas, em sinergia com políticas públicas nacionais e internacionais, haja vista a necessidade de uma correspondente adaptação do parque industrial e tecnológico em geral, para uma transição da era do petróleo para a era das fontes renováveis. O leque das alternativas que estão sendo aplicadas e/ou estudadas é amplo: hidrelétrica, solar, eólica, das marés, geotérmica, gravitacional e finalmente, o que interessa especificamente esse estudo, de biomassa ¹.

¹ A energia nuclear, apesar de ser considerada uma alternativa válida por muitos, em vista da substituição de fontes fósseis, não é aqui citada por não ser *renovável*.

Além da fonte específica de energia está sendo avaliado o impacto da modalidade centralizada ou distribuída de produção energética e do gerenciamento de resíduos: no caso da fonte hidrelétrica, por exemplo, apesar de ser renovável, são discutidos os impactos ambientais de grandes centrais e os custos elevados da distribuição e das perdas associadas. No setor elétrico, os resultados de panes em grandes usinas produtoras, com consequentes apagões de grande porte, têm posto sob questionamento o gigantismo da geração elétrica, relacionando a maior distribuição da geração com uma maior segurança de abastecimento. Este conceito é bem ilustrado pela comparação dos efeitos do apagão brasileiro de 2009 com os do blackout que afetou o nordeste americano em 2003, especificamente a área metropolitana de Nova Iorque, onde uma política de geração elétrica distribuída havia sido implementada, conforme a Figura 2:

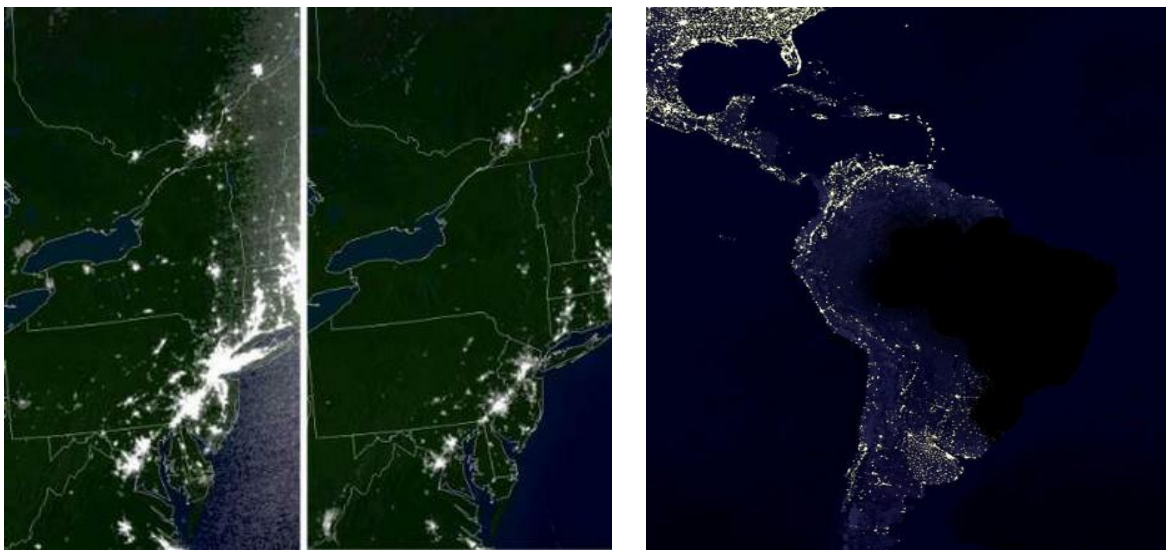


Fig. 2 - Blackout na área metropolitana de Nova Iorque, 2003 vs. Brasil 2009

O estudo da UNEP-FS sobre investimentos em fontes renováveis oferece um quadro do que já aconteceu até hoje, quais fontes alternativas foram desenvolvidas e geraram investimentos públicos e privados. Os dados disponibilizados na Tabela 1 evidenciam, entre outros aspectos, como:

- a. As fontes eólica e solar sejam de longe as que receberam mais investimentos nos último 12 anos

- b. A biomassa, que aqui computa em conjunto a queima direta (ex. lenha e bagaço de cana), a Waste-to-Energy, (principalmente incineração) e a biomassa moderna, apesar de ter um peso relevante (8 bilhões de U\$ em 2014) não tem tido uma taxa de crescimento dos investimentos interessante (CAGR – Compound Annual Gross Rate 2004-2014 de 1%)
- c. O crescimento dos investimentos do Brasil nesse setor seja bom se comparadas com a média total, porem ligado em maior parte a investimentos no setor sucroalcooleiro e papelero (combustão direta em caldeiras e cogeração com bagaço de cana e licor negro).

Tabela 1 - Investimentos em energias renováveis - Fonte FS-UNEP 2016

Category	Year Unit	2004 \$bn	2005 \$bn	2006 \$bn	2007 \$bn	2008 \$bn	2009 \$bn	2010 \$bn	2011 \$bn	2012 \$bn	2013 \$bn	2014 \$bn	2013-14 Growth %	2004-14 CAGR %
1 Total Investment														
1.1 New investment		45.1	72.9	112.1	153.9	181.8	178.5	237.2	278.8	256.4	231.8	270.2	17%	20%
1.2 Total transactions		53.9	99.1	148.1	212.5	241.1	242.7	295.7	352.3	324.1	298.6	339.0	13%	20%
2 New Investment by Value Chain														
2.1 Technology development														
2.1.1 Venture capital		0.4	0.6	1.2	2.1	3.2	1.6	2.5	2.5	2.4	0.7	1.0	39%	11%
2.1.2 Government R&D		1.9	2.0	2.2	2.7	2.8	5.3	4.7	4.6	4.5	4.9	5.1	3%	10%
2.1.3 Corporate R&D		3.2	2.9	3.1	3.5	4.0	4.1	4.2	5.1	5.0	6.6	6.6	1%	7%
2.2 Equipment Manufacturing														
2.2.1 Private equity expansion capital		0.3	1.0	3.0	3.6	6.8	2.9	3.1	2.5	1.7	1.4	1.7	20%	18%
2.2.2 Public markets		0.3	3.7	9.1	20.7	10.9	13.1	11.4	10.1	3.9	10.5	15.1	43%	50%
2.3 Projects														
2.3.1 Asset finance		30.4	52.5	84.7	110.4	135.4	120.0	154.6	181.2	163.2	154.6	170.7	10%	19%
Of which re-invested equity		0.0	0.2	0.7	3.1	3.7	1.9	5.6	3.3	2.9	1.9	3.6	90%	-
2.3.3 Small distributed capacity		8.6	10.3	9.5	14.1	22.3	33.4	62.2	76.1	78.8	54.9	73.5	34%	24%
Total Financial Investment		31.4	57.6	97.3	133.7	152.7	135.6	166.1	192.9	168.1	165.4	185.0	12%	19%
Gov't R&D, corporate R&D, small projects		13.7	15.3	14.8	20.2	29.1	42.8	71.2	85.9	88.3	66.4	85.2	28%	20%
Total New Investment		45.1	72.9	112.1	153.9	181.8	178.5	237.2	278.8	256.4	231.8	270.2	17%	20%
3 M&A Transactions														
3.1 Private equity buy-outs		0.8	3.7	1.8	3.6	5.4	2.2	2.0	3.1	3.3	0.6	2.5	335%	12%
3.2 Public markets investor exits		0.4	2.4	2.7	4.0	1.0	2.5	4.9	0.2	0.4	1.8	1.9	6%	18%
3.3 Corporate M&A		2.4	7.6	12.3	20.3	17.6	21.8	19.4	30.1	10.1	15.2	9.8	-35%	15%
3.4 Project acquisition & refinancing		5.3	12.5	19.1	30.6	35.4	37.8	32.1	40.1	53.8	49.3	54.5	11%	26%
4 New Investment by Sector														
4.1 Wind		17.9	29.1	39.6	61.6	75.2	81.2	98.9	84.2	84.1	89.3	99.5	11%	19%
4.2 Solar		12.0	16.3	22.1	38.0	60.8	63.7	103.3	155.7	144.3	119.8	149.6	25%	29%
4.3 Biofuels		3.9	9.6	28.4	28.7	19.2	10.2	10.1	10.4	7.0	5.5	5.1	-8%	3%
4.4 Biomass & w-t-e		7.4	9.6	12.1	15.8	16.9	13.9	16.0	17.4	12.4	9.3	8.4	-10%	1%
4.5 Small hydro		2.6	7.2	7.6	7.1	7.8	6.3	5.7	7.2	6.4	5.5	4.5	-17%	6%
4.6 Geothermal		1.2	1.0	1.5	2.0	1.7	2.9	3.0	3.7	1.8	2.2	2.7	23%	9%
4.7 Marine		0.0	0.1	0.9	0.8	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	110%	24%
Total		45.1	72.9	112.1	153.9	181.8	178.5	237.2	278.8	256.4	231.8	270.2	17%	20%
5 New Investment by Geography														
5.1 United States		5.4	11.6	29.1	33.0	35.1	24.3	35.1	50.0	38.2	36.0	38.3	7%	22%
5.2 Brazil		0.8	3.1	5.2	11.8	12.1	7.9	7.7	10.1	7.2	3.9	7.6	93%	25%
5.3 AMER (excl. US & Brazil)		1.7	3.3	3.9	5.0	5.8	5.8	12.2	9.2	10.2	12.2	14.8	21%	24%
5.4 Europe		23.6	33.6	46.7	66.4	81.6	81.2	111.1	120.7	89.6	57.3	57.5	0%	9%
5.5 Middle East & Africa		0.6	0.8	1.1	2.4	2.3	1.7	4.2	2.9	10.4	8.7	12.6	46%	36%
5.6 China		3.0	8.2	11.1	16.6	25.7	39.5	38.7	49.1	62.8	62.6	83.3	33%	39%
5.7 India		2.7	3.1	4.9	6.3	5.6	4.3	9.0	12.7	7.4	6.4	7.4	14%	10%
5.8 ASOC (excl. China & India)		7.2	9.2	10.0	12.5	13.6	13.7	19.3	24.1	30.5	44.7	48.7	9%	21%
Total		45.1	72.9	112.1	153.9	181.8	178.5	237.2	278.8	256.4	231.8	270.2	17%	20%

Footnote: New investment volume adjusts for re-invested equity. Total values include estimates for undisclosed deals.

Algumas notações são necessárias em relação a esses dados e ao objeto de nosso estudo:

- a. Relativamente à biomassa a metodologia do estudo não diferencia biomassa tradicional e *biomassa moderna*, não permitindo avaliar quanto desses investimentos foi dedicado à segunda.

b. Relativamente á biomassa são considerados só empreendimentos acima de 1 MW instalado. Para o biogás em específico a realidade das usinas na Europa segue uma regra de incentivos que limita os empreendimentos até 999 KW instalados, excluindo portanto o impacto que essa fonte de fato teve nos países europeus sobre tudo em relação às matrizes elétricas (cfr. Os dados apresentados no ponto **a.** dessa introdução).

c. A biomassa Residual e a Biodigestão Anaeróbia se inserem no grupo das chamadas bioenergias, que incluem as rotas termoquímica (pirólise, gaseificação, *fuel cells*, etc.), bioquímica (etanol, biogás, etc.) e oleoquímica (biodiesel, etc.), que apresentaremos resumidamente no Cap.3 dessa tese. A grande pergunta em relação às bioenergias, haja vista os investimentos listados na Tabela 1 é: qual peso elas terão no futuro da Matriz Energética Brasileira? São as energias eólica e solar realmente as que mais merecem investimentos e dispositivos de incentivação pública a fontes renováveis? Essa pergunta, juntamente com a questão *biomassa residual vs. culturas energéticas*, talvez seja a mais relevante do ponto de vista estratégico para os legisladores, na avaliação do assunto *energias renováveis e bioenergias*. Tem que ser levado em conta o potencial energético ínsito na biomassa brasileira ² em função das rotas de aproveitamento (BASTO OLIVEIRA, PINGUELLI ROSA, 2003), do potencial em termos de redução de emissões GEE e sequestro de carbono (BECCS), que veremos mais adiante nessa introdução, e da intermitência das fontes eólica e solar: há indícios de que muita mais atenção e consequentes investimentos deveriam ser dedicados às bioenergias, no modelo de incentivos que já foi realizado para o biodiesel. Na Itália, por exemplo, um país que tem recursos energéticos escassos, o PAN - Plano de Ação Nacional para as Energias Renováveis (2010-2020), curado pelo Ministério do Desenvolvimento Económico, confere às bioenergias um peso de 45% sobre o total das energias renováveis, bem abaixo do que está acontecendo também nos países desenvolvidos, em termos de investimentos. Ou seja: existe ainda um *gap* entre o que sabemos ser o melhor caminho e as ações consequentes para percorrê-lo. Este *gap* se explica em parte com o maior grau de complexidade tecnológica ligada ao conjunto das bioenergias e a maior necessidade de integração de

² Nos limitamos aqui em considerar o potencial energético ínsito na biomassa residual, sem considerar outro potencial que não abordamos nesse trabalho: a possibilidade de agregar valor á biomassa pelas diferentes rotas das biorrefinarias, na qual a biodigestão anaeróbia é incluída. Principalmente vários produtos oriundos das rotas bioquímica, oleoquímica, sucroquímica, fitoquímica e de conversão de CO₂ (citar aqui CGEE Química Verde 2010-2030)

vários setores tecnológicos e científicos, e dos setores agrícola, agropecuário, industrial, da gestão de resíduos e elétrico, para chegar a arranjos que viabilizem empreendimentos industriais na quantidade e na escala desejada. É um *gap também* vindo da necessidade de informações mais detalhadas em relação à biomassa brasileira, em que se insere o escopo desse trabalho, informações analíticas que sirvam de base para estudos de localização, escolha da melhor ou melhores rotas em contextos distribuídos, estudos de viabilidade de usinas específicas. Uma comparação pode ser feita com o Atlas Solarimétrico do Brasil e o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2000; CRESESB, 2001). Analogamente, um Atlas do Potencial Bioenergético do Brasil é desejável, pensado em função das diferentes tecnologias disponíveis e das informações das quais cada rota necessita para avaliar seus projetos. O que chama atenção, em relação à produção técnica e científica relativa à biomassa, é a grande quantidade de conhecimentos específicos, tecnologias, know-how e a total escassez de dados analíticos sobre as quantidades, qualidades e tipologias de biomassas disponíveis no território, dados que fundamentem projetos industriais específicos. Essa escassez naturalmente é devida à dificuldade de coletar e organizar esses dados, porém sentimos a falta de tentativos de organizar e sistematizar a metodologia dessa organização e o ambiente informático que é preciso para o alojamento e processamento desses dados ³.

Nas considerações sobre a oportunidade de promover em específico o Biogás/Biometano entra também o posicionamento em relação ao papel do GN-Gás Natural, que de fato é, em grandes escalas, a fonte energética com maior perspectiva de crescimento até 2030 no Brasil, com estimativas de passar do atual 10,3% para 15,5% da Matriz Energética (ABEGAS, 2016). É notório, devido principalmente a escolhas estratégicas ocorridas nas décadas de '50 e '60 do século passado, que no Brasil ainda não se formou uma *cultura* do gás (FERNANDES, F, MOUTINHO DOS SANTOS, V. 2004). No mesmo tempo muitos argumentos, tanto econômicos como ambientais, apontam para oportunidade de promover essa fonte, inclusive com uma reconversão do parque industrial e tecnológico brasileiro em função disso. Há quem aponta o papel estratégico do Gás Natural na transição da era do petróleo para era das fontes renováveis (SANTOS, E.M. ET

³ Precisa citar aqui o esforço feito pela USP-IEE na montagem do CENBIO e do Banco de Dados de Biomassa, apesar das dificuldades em disponibilizar dados. Já em relação ao SINIR, previsto pela PNRS de 2010, há só indicações genéricas relativas a uma organização dos dados sobre resíduos.

AL., 2002), tendo isso mais uma implicação positiva para o biogás/biometano, que por suas características físico-químicas se assimila em tudo ao GN, tanto para fins energéticos como veiculares e de insumo químico.(ANP, 2015). Um estudo da GHK Company nos EUA (HEFNER III, R.A., 2007) preconiza que essa era dos gases já teria começado no fim do século passado, com o cruzamento das curvas relativas a combustíveis sólidos/líquidos (lenha, petróleo, carvão) e combustíveis gasosos (metano e hidrogênio), conforme ilustrado na Figura 3:

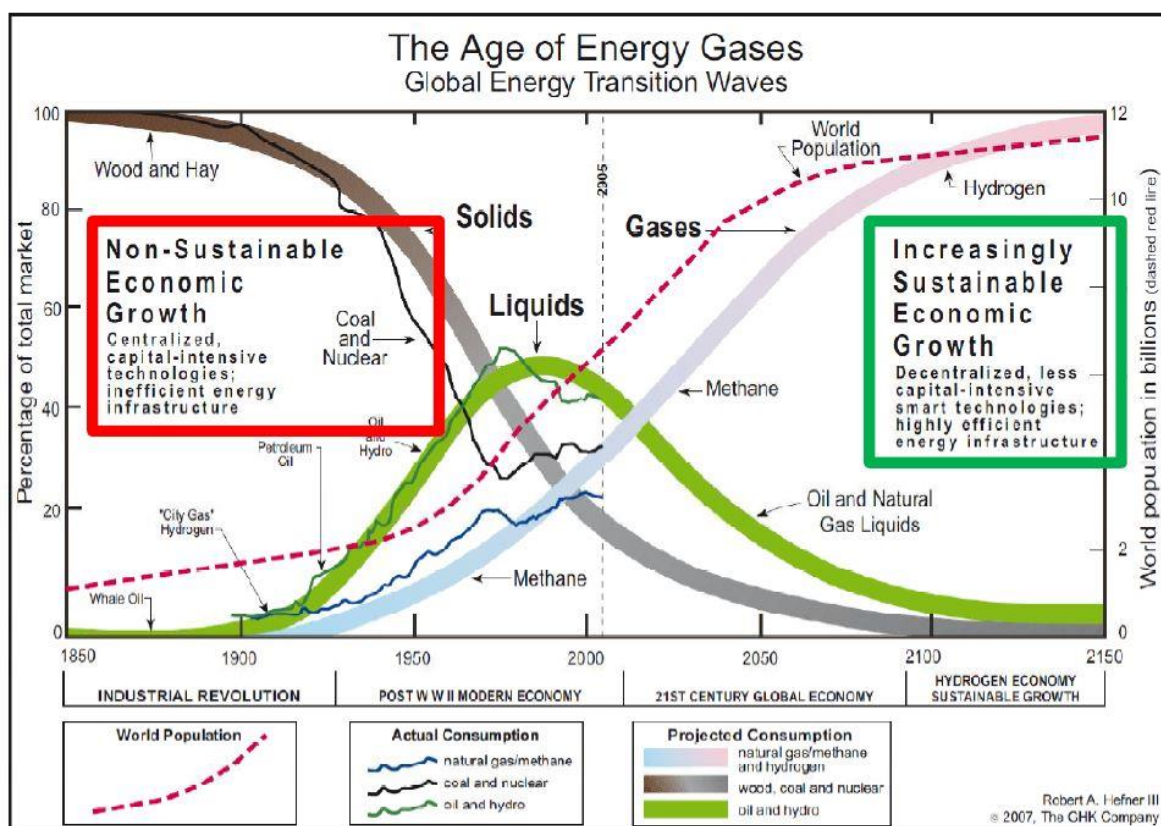


Fig. 3 - Transição global de fontes energéticas - Fonte Hefner III GHK Company, 2007

1.4 Biodigestão Aneróbia: saneamento, energia e carbono

Entre as possíveis rotas para aproveitamento de biomassa residual, que serão apresentadas no Capítulo 3, estamos priorizando a Biodigestão Anaeróbia por razões que vão além dos cálculos do balanço de massa e aproveitamento do potencial energético. Uma comparação entre essas rotas é possível (PRETO, 2010), de forma que projetos pontuais localizados poderão avaliar, em fase de viabilidade, qual a melhor opção. Mas de um ponto

de vista estratégico, que interessa governantes e legisladores, é importante avaliar o valor infraestrutural e as externalidades de curto, médio e longo prazo ligadas às várias tecnologias, e as sinergias que elas alavancam com os setores agrícola, agropecuário, do saneamento ambiental e gestão de resíduos. No caso da biodigestão anaeróbia, além das já citadas vantagens em termos de produção de energia (elétrica e/ou biometano), saneamento ambiental e captura de emissões de GEE, temos outro plus ligado ao conceito de uma agricultura sustentável com práticas que, rodando em volta do biodigestor anaeróbio instalado, resultam em sequestro e armazenamento do carbono no solo e redução no uso de fertilizantes de origem fóssil. Vale lembrar que hoje cerca de 30% das emissões de GEE são originadas pelo setor agrícola. Uma experiência italiana, em colaboração com o Departamento AgBioResearch da MSU-Michigan State University, tem resultado em uma iniciativa pioneira de manejo agrícola, resumida na plataforma tecnológica denominada BiogasDoneRight (CIB, 2016). O interesse dessa plataforma orgânica de manejo agrícola e agropecuário reside primeiramente numa reflexão sobre a realidade das mudanças climáticas e as metas de redução da CO₂ presente na atmosfera, resumidas no Gráfico 1. Esse estudo é de autoria de dois engenheiros da Google, que estiveram envolvidos no ambicioso desafio lançado pela empresa em 2007, chamado de RE<C Renewable Energy Cheaper Than Coal. Essa iniciativa foi abandonada em 2011 pela Google em vista da impossibilidade de se competir com o carvão no atual estado da arte das novas fontes de energia. Com isso uma nova reflexão e um novo desafio foram apresentados pelos autores, com base em estimativas sobre a evolução do efeito estufa em diferentes cenários, no Gráfico 1:

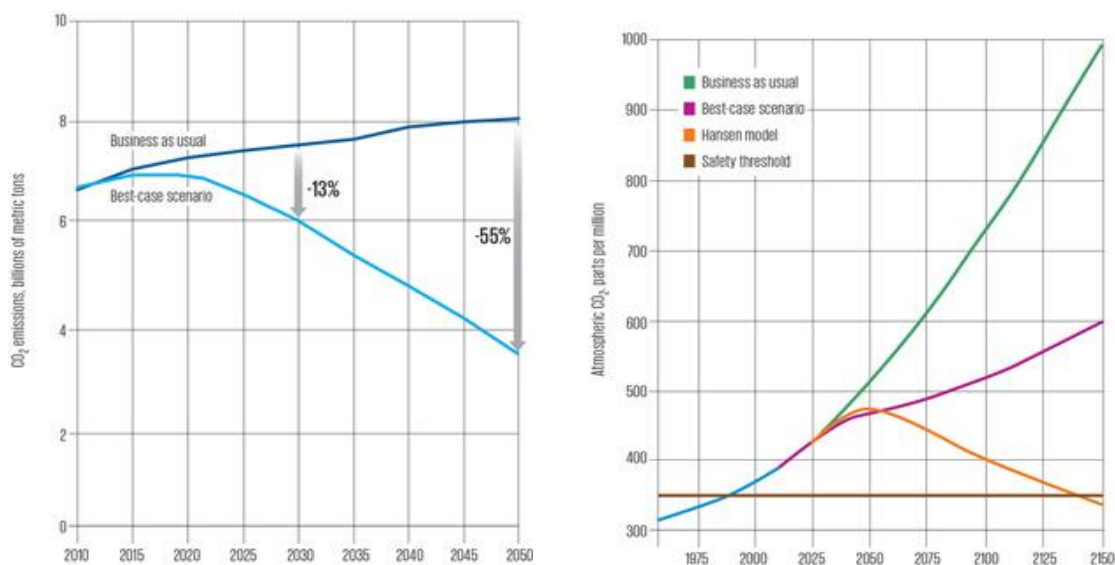


Gráfico 1 - Cenários de redução CO₂ - Fonte R. Konigstein, D. Fork 2014

mesmo implementando hoje formas de produção de energia que substituam rapidamente as centrais a carvão, como mostra a linha azul do *Best Case Scenario*, isso não levaria a concentração de CO₂ na atmosfera abaixo do limite de segurança estimado em 350 ppm e consequente manutenção do aquecimento global abaixo do teto de 1,5 graus até 2050 (COP 21, 2015). Isso é devido ao fato de que a CO₂ que resultou das atividades humanas a partir da Revolução Industrial até hoje, ficará por muito tempo na atmosfera mantendo os condições para o aquecimento global. Em outras palavras, o desafio, além da conversão das matrizes energéticas, está na retirada de carbono da atmosfera e em sua estocagem nos solos agrícolas. Dentro do leque das energias renováveis, somente as que se utilizam de biomassa, como a pirólise e a biodigestão anaeróbia, tem condição de contribuir para o sequestro e estocagem de carbono. A plataforma *BiogasDoneRight*, já aplicada com sucesso na Itália, combina a Biodigestão Anaeróbia com outras práticas de manejo agrícola que, quando aplicadas em sinergia, podem:

- sequestrar carbono das biomassas e estocá-lo de forma duradoura em terrenos ainda produtivos ou em áreas já afetadas por baixa produtividade e até desertificação. Aumentam-se progressivamente, dessa forma, até um ponto de equilíbrio, as componentes orgânicas dos solos (*humificação*), que constituem sua *estrutura fértil*, sequestrando carbono no solo por meio da aspersão do adubo resultante da biodigestão anaeróbia (ampliação em escala do conceito de agricultura biológica). Paralelamente esse sequestro incide na retirada e

redução de CO₂ da atmosfera. Pois o carbono contido no fertilizante orgânico tem origem na retirada de CO₂ da atmosfera pelo processo da fotossíntese. Já os fertilizantes inorgânicos, muitos, como a ureia, de origem petroquímica, apesar de nutrir as plantas de forma rápida e eficiente, em nada contribuem para a manutenção da qualidade da estrutura do solo ligada a seu conteúdo de substância orgânica.

- incrementar a NPP – Produção Primária Líquida, que é o principal indicador de saúde de um ecossistema em vista da possível perda de fertilidade (estoque de carbono) e desertificação (MAPA/EMBRAPA, 2008) das terras cultivadas, que é um dos problemas das modernas práticas agrícolas convencionais.
- conseguir esses objetivos com um balanço financeiro positivo, onde os custos para captura, transferência e distribuição da CO₂ são compensados pela maior produtividade agrícola, maior retenção hídrica e biodiversidade e venda de energia elétrica, ração e biofertilizantes excedentes.
- Transformar as tecnologias CCS (Carbon Capture and Storage) e BECCS (Bio-Energy Carbon Capture and Storage) de custos para oportunidades de negócio, desvinculando a fertilização orgânica do aumento acoplado da pecuária, viabilizando para os agricultores o casamento de práticas sustentáveis com produtividade.

As razões que apontam a Biodigestão Anaeróbia entre as melhores práticas, além do ponto de vista da conversão da biomassa em energia, também do ponto de vista do sequestro de carbono são as seguintes:

- Eficaz conversão do carbono em biogás (entre 75 e 85% do carbono orgânico), mesmo em pequena escala (> 500.000 l/ano de diesel-equivalente) e com tecnologias acessíveis, maduras e livres de patentes.
- Flexibilidade em relação aos diferentes substratos e situações agrícolas e climáticas
- Adubação e uso de fertilizantes orgânicos mesmo em propriedades que não tem estoque pecuário e disponibilidades de réfluos zootécnicos (dejetos animais).

A estimativa do potencial de instalação elétrica que apresentamos no ponto a. dessa introdução é realístico e até prudencial em vista da disponibilidade de resíduos orgânicos, terras cultivadas e cultiváveis e parque pecuário e zootécnico brasileiro: o mero valor de venda da energia elétrica e a baixa cotação das RCE (vulgo Créditos de Carbono), não dão conta, financeiramente, das externalidades conexas à biodigestão anaeróbia, como o

saneamento ambiental, a correta gestão dos resíduos, o sequestro de carbono e redução de emissões de GEE. Essas externalidades são de interesse público e por isso justificam um sistema de incentivação. Essa realização, todavia, depende muito do acolhimento pelos próximos governos das propostas avançadas pelas associações de categoria e apoiadas pela sociedade civil e as organizações ambientalistas: incentivos, desoneração fiscal, facilitação da burocracia e abertura de linhas de crédito dedicadas, entre outras. Veja-se em propósito o PNBB – Programa Nacional do Biogás e Biometano proposto pela Abiogás, Associação Brasileira de Biogás e Biometano.

O quadro que apresentamos nessa introdução sustenta a importância de se apoiar o desenvolvimento da Biodigestão Anaeróbia no Brasil, em todos os contextos, urbanos e rurais, onde ela qualifica. Motiva também essa proposta, que, em consideração da outra ponta da questão que são os projetos pontuais de usinas descentralizadas de biodigestão anaeróbia, de pequeno/médio porte, que necessitam de informações detalhadas em relação a montantes localizados de biomassa residual, incluindo informações sobre seu potencial metanogênico e sobre a logística de provisionamento. O modelo de Base de Dados proposto justamente visa oferecer informações sobre a localização, a quantidade e a qualidade de biomassa residual no território brasileiro, conforme apresentado no Cap. 6. Já os outros capítulos, cujo conteúdo é sintetizado no Resumo Executivo abaixo, servem para completar o quadro de referência em que o assunto da biomassa residual se insere, de um ponto de vista ambiental, energético, tecnológico e regulatório

1.5 Identificação do problema e prognóstico sobre biogás

Vamos aqui sintetizando esse cenário da Energia vs. Bioenergia, para, sucessivamente, tentar delinear uma definição de biomassa em geral, de biomassa como fonte de energia e, finalmente, biomassa na acepção desse estudo, em função da Biodigestão Anaeróbia (Biogás).

A situação da Matriz Energética brasileira atual é resumida pelas Figuras 7 e 8 abaixo, com domínio de combustíveis fósseis e biomassa tradicional para energia primária e da fonte hidro para energia elétrica. Os movimentos científicos, políticos e sociais liderados, a nível internacional, pelo IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, a nível brasileiro pelo PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, além de

inúmeras outras organizações ambientalistas, ONGs e representações da sociedade civil, clamam há muitos anos por medidas que viabilizem uma guinada rumo uma participação mais intensa das fontes renováveis.

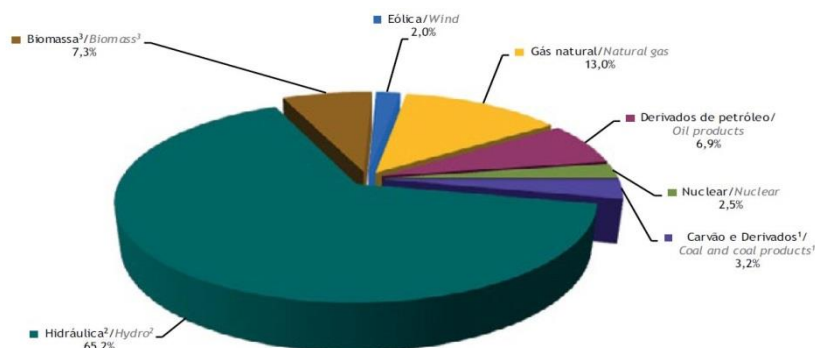


Figura 7 - Matriz energética brasileira - Fonte BEN 2015, Oferta de Energia Elétrica

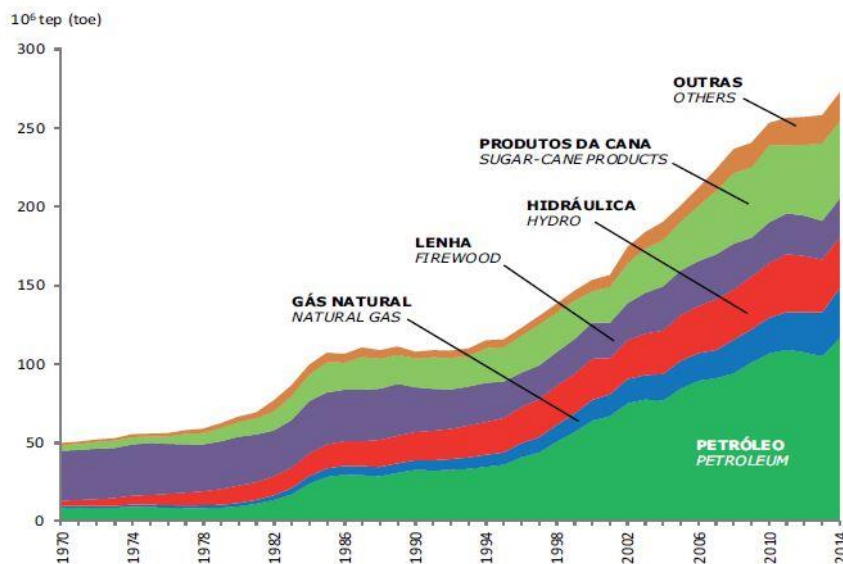


Figura 8 - Matriz energética brasileira - Fonte BEN 2015, Produção de energia primária

Todos os documentos oficiais de cunho internacional (Conferência Rio-92; Protocolo de Kioto, 1997; COP 21 de Paris 2015) e brasileiros (PROINFA, 2004; MMA/PNE 2030; etc.) manifestam essa intenção dos governos e da sociedade. As fontes principais que são candidatas para contribuir nessa direção são: biomassa, eólica e solar, de forma unânime, e a nuclear, de forma controversa.

Dessas fontes citadas, só a eólica tem apresentado nos últimos anos um avanço relevante: na Matriz Elétrica de 2009, participação de 0,2% ; na de 2014, participação de 2 %, com crescimento de 1000%. Já o impacto da solar é ainda irrelevante, não sendo levado em conta nos BEN de 2009 e de 2015. Relativamente à biomassa, que mais interessa o presente trabalho, temos primeiramente que distinguir entre biomassa tradicional (lenha, bagaço de cana e licor negro ⁴) e outras fontes de biomassa, chamadas de biomassa moderna (lodos de tratamento de esgoto, resíduos silvícolas, industriais orgânicos, agrícolas e agropecuários, FORSU, fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos e culturas energéticas). Em relação à biomassa tradicional temos em 2009 uma contribuição de 29% na Matriz de Energia Primária, de 27,2 em 2015, sinalizando uma queda de 1,8%. Já na Matriz Elétrica a fonte de biomassa tradicional sinaliza 5,4% em 2009 e 7,3% em 2015, com aumento de 1,9%. As fontes modernas de biomassa, nos balanços da EPE considerados, não são levadas em conta separadamente, não ficando claro se entram entrando no item biomassa ou em outras. Mais provavelmente não são computadas devido a suas irrelevâncias numéricas. Relativamente à Matriz de Energia Primária, as outras fontes somam: 3,8% em 2009; 4,6 em 2015, sendo que esses dados agregam solar, cogeração qualificada, e outras. Na Matriz elétrica, tanto em 2009 quanto em 2015 é considerado irrelevante o aporte da fonte biomassa moderna.

Dentro desse cenário, considerando as diretrizes do PNE 2030 – Plano Nacional de Energia, publicado em conjunto pelo MME e pela EPE em 2007, notamos que as fontes energéticas derivantes de biomassa tradicional são relevantes e com índices em crescimento sobretudo em relação ao setor canavieiro. Já as fontes de biomassa moderna, independentemente da importância dada a elas pelos setores de saneamento ambiental e gestão de resíduos sólidos, são ainda irrelevantes nas atuais matrizes energéticas. Essa consideração ganha força se consideramos que as tecnologias que se utilizam de biomassa moderna, mesmo quando comparadas com as outras energias renováveis, são as únicas que apresentam externalidades relevantes (além da criação de postos de trabalho que é comum a essas tecnologias). Trata-se de: saneamento ambiental; gerenciamento de resíduos; redução das emissões GEE; sequestro e estocagem de carbono no solo; aumento da fertilidade dos

⁴ O licor negro não pode a rigor ser definido biomassa por ser oriundo de processamento químico da madeira e conter em média 40% de componentes inorgânicos como hidróxido de sódio, sulfeto de sódio, etc. (FORTUNATTO, A.C., 2014).

solos e da agricultura biológica, todos itens cujo impacto socioeconômico não entra na conta de cada projeto específico, em termos de retorno financeiro para o empreendedor privado ou público, mas tem recaída positiva para sociedade como um todo. Esse é um argumento importante para consideração relativa a incentivação do estado para essas tecnologias, numa visão sistêmica integrada de médio e longo prazo, também de emprego adequado dos recursos fiscais.

Muitos estudos apontam para um grande potencial energético das fontes de biomassa moderna (BASTO OLIVEIRA L., PINGUELLI ROSA L., 2003) considerando várias rotas tecnológicas, sobretudo em relação à geração distribuída e, contextualmente, com impacto positivo em um modelo também distribuído de saneamento ambiental. O potencial energético total vindo de biomassa é estimado por volta de 460 Mtep (EPE/MME 2014b) em 2050, vindo de aproximadamente 210 Mtep em 2013. Isso equivale a 2442 TWh de potencial elétrico em 2013 e mais de 5000 TWh em 2050, quase dez vezes a demanda elétrica nacional de 2013 (BEM 2014). Considerando uma eficiência de transformação de 20% teríamos hoje toda demanda elétrica brasileira de 2013 coberta. Deste potencial o estudo aponta que, em 2013, 56% deste montante é constituído por biomassa residual, também definida como biomassa moderna. Só com a biomassa moderna, portanto temos hoje um potencial para suprir cerca de 50% da demanda de energia elétrica nacional. Isso tudo, naturalmente, a nível teórico, porque tem que se levar em conta a natureza distribuída da biomassa e suas características, sobre tudo no tocante à relação entre a componente lignina vs. outras componentes orgânicas de maior volatilidade (celulose, hemicelulose, açúcares, proteínas e carboidratos de rápida digestibilidade). Uma avaliação realística do potencial energético da biomassa residual portanto passa por uma avaliação da sua localização e disponibilidade e do seu potencial em relação à tecnologia de transformação, no caso da biodigestão anaeróbia o potencial metanogênico. O estudo citado acima, por exemplo, avalia que somente a obtenção de 20% do biogás potencial vindo de biomassa residual rural seja efetivamente viável. Considerando que a maior parte da biomassa residual brasileira é de origem rural e agrossilvopastoril se trata de qualquer forma de um potencial relevante. O estudo citado se resume numa projeção da penetração da geração distribuída de biogás até 2050, conforme a Gráfico 2:

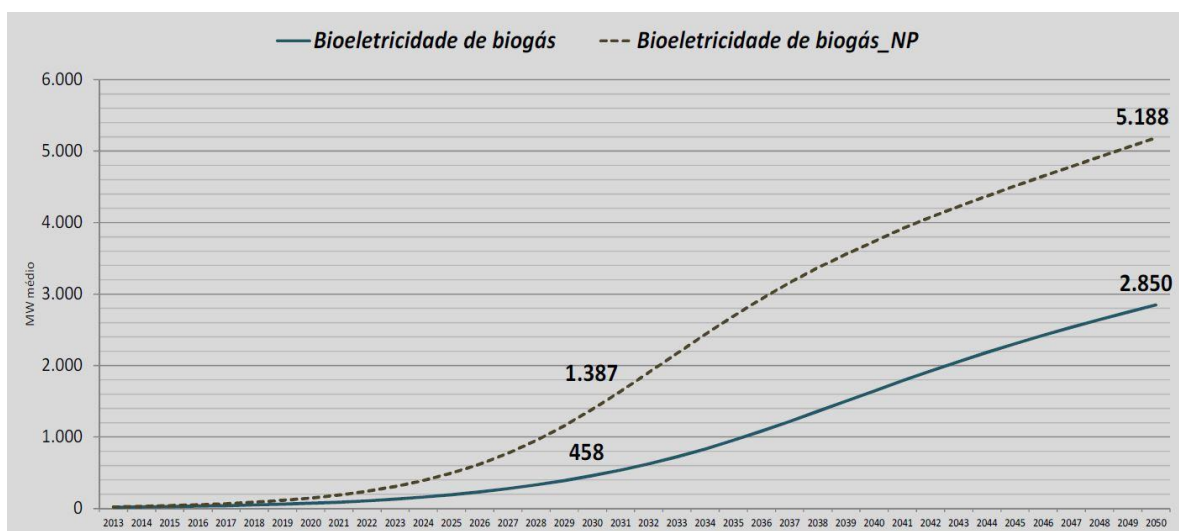


Gráfico 2 - Bioeletricidade de biogás - Fonte EPE, Nota Técnica DEA 13/14

Tabela 2 - Potencial elétrico do biogás no Brasil - Fonte EPE, 2014

	Rota 1 – CR		Rota 2 – BE somente pecuária		Rota 2 – BE pecuária + agrícola		Rota 3 – QC	Mercado atual	CR / mercado
	Nº de unidades	MW	Nº de unidades	MW	Nº de unidades	MW	MWh	GWh	%
Rondônia	10	120	89	89	106	106	0		
Acre	4	48	9	9	12	12	0		
Amazonas	1	12	13	13	15	15	0		
Roraima	1	12	3	3	3	3	0		
Pará	26	312	81	81	102	102	0		
Amapá	0	0	1	1	1	1	0		
Tocantins	17	204	48	48	61	61	0		
NORTE	62	744	247	247	300	300	0	29.049	13%
Maranhão	29	348	70	70	91	91	0		
Piauí	15	180	34	34	44	44	0		
Ceará	5	60	81	81	95	95	0		
Rio Grande do Norte	1	12	27	27	31	31	0		
Paraíba	1	12	30	30	35	35	0		
Pernambuco	3	36	82	82	96	96	0		
Alagoas	1	12	18	18	22	22	0		
Sergipe	9	108	25	25	31	31	0		
Bahia	70	840	229	229	287	287	0		
NORDESTE	138	1.656	599	599	732	732	0	75.610	12%
Minas Gerais	94	1.128	585	585	709	709	170.183		
Espírito Santo	1	12	55	55	63	63	0		
Rio de Janeiro	1	12	48	48	56	56	0		
São Paulo	27	324	348	348	411	411	11.414		
SUDESTE	125	1.500	1.037	1.037	1.239	1.239	181.598	235.237	3%
Paraná	339	4.068	439	439	566	566	25.844		
Santa Catarina	64	768	343	343	418	418	0		
Rio Grande do Sul	259	3.108	332	332	429	429	0		
SUL	663	7.956	1.114	1.114	1.413	1.413	25.844	77.503	54%
Mato Grosso do Sul	92	1.104	79	79	102	102	555.432		
Mato Grosso	274	3.288	114	114	148	148	44.929		
Goiás	121	1.452	273	273	353	353	635.341		
Distrito Federal	4	48	10	10	13	13	0		
CENTRO-OESTE	492	5.904	478	478	616	616	1.235.702	30.718	101%
BRASIL	1.482	17.784	3.478	3.478	4.300	4.300	1.443.144	448.117	21%

Essa projeção portanto aponta pela possibilidade de instalar desde já 2850 MWe até 2050, chegando, em caso de novas políticas incentivadoras, além dos 5000 MWe instalados em 2050. Outro estudo do MME/EPE (MME/EPE, 2014c) computa desde já um potencial brasileiro de 3478 unidades produtoras de biogás e de 4300 MWe instalados, conforme a Tabela 2 acima.

Relativamente à biomassa moderna, além da questão energética, é discutida a oportunidade de se gerenciar os resíduos quanto mais possível de forma distribuída, com técnicas de redução, reuso, reciclagem e disposição adequadas. Na Europa vários países chegaram a taxas muito elevadas de gerenciamento adequado dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por meio de várias tecnologias que incluem coleta seletiva, reciclagem, incineração e biodigestão anaeróbia. Na Alemanha, por exemplo, a taxa de recuperação dos resíduos sólidos urbanos (que contêm mais de 40% de matéria orgânica), por meio das várias tecnologias somadas, está hoje em 65%, com um target prefixado por lei de chegar a 100% em 2020, com subsequente extinção dos aterros sanitários (UMWELT BUNDESANT, 2015). Relativamente à aplicação da biodigestão anaeróbia para tratamento da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), uma importante parcela do que definimos de biomassa moderna, os Gráficos 3 e 4 mostram a situação na Europa:

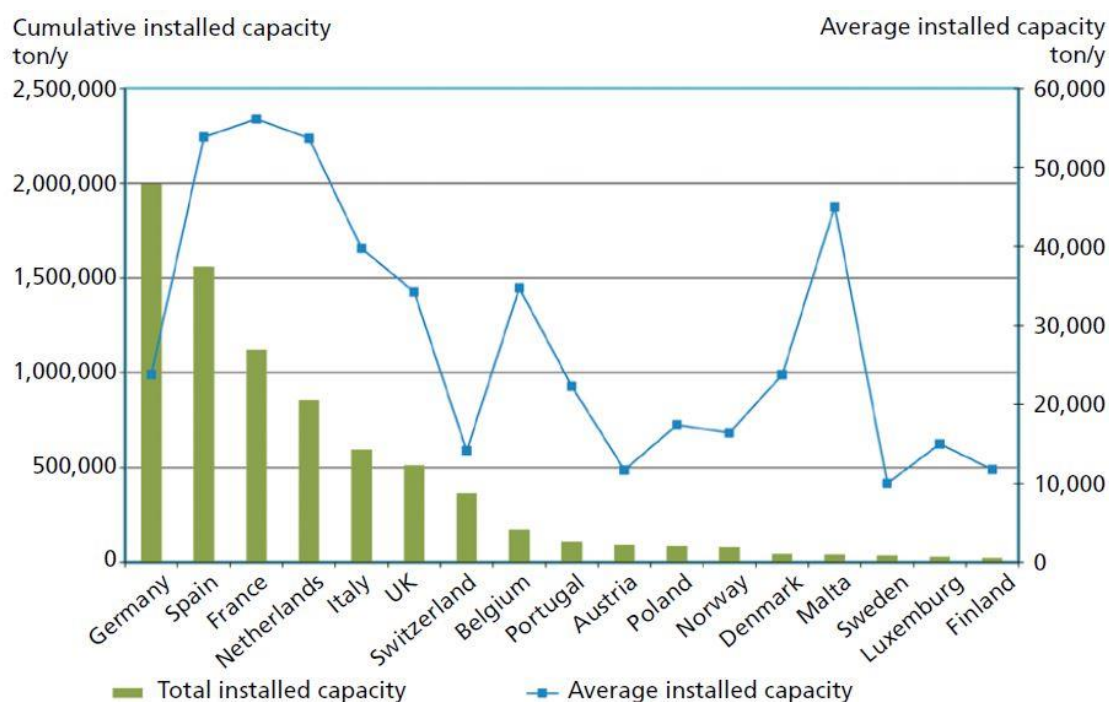


Gráfico 3 - Biodigestão de FORSU na Europa - Fonte De Baere, Mattheeuws, 2012

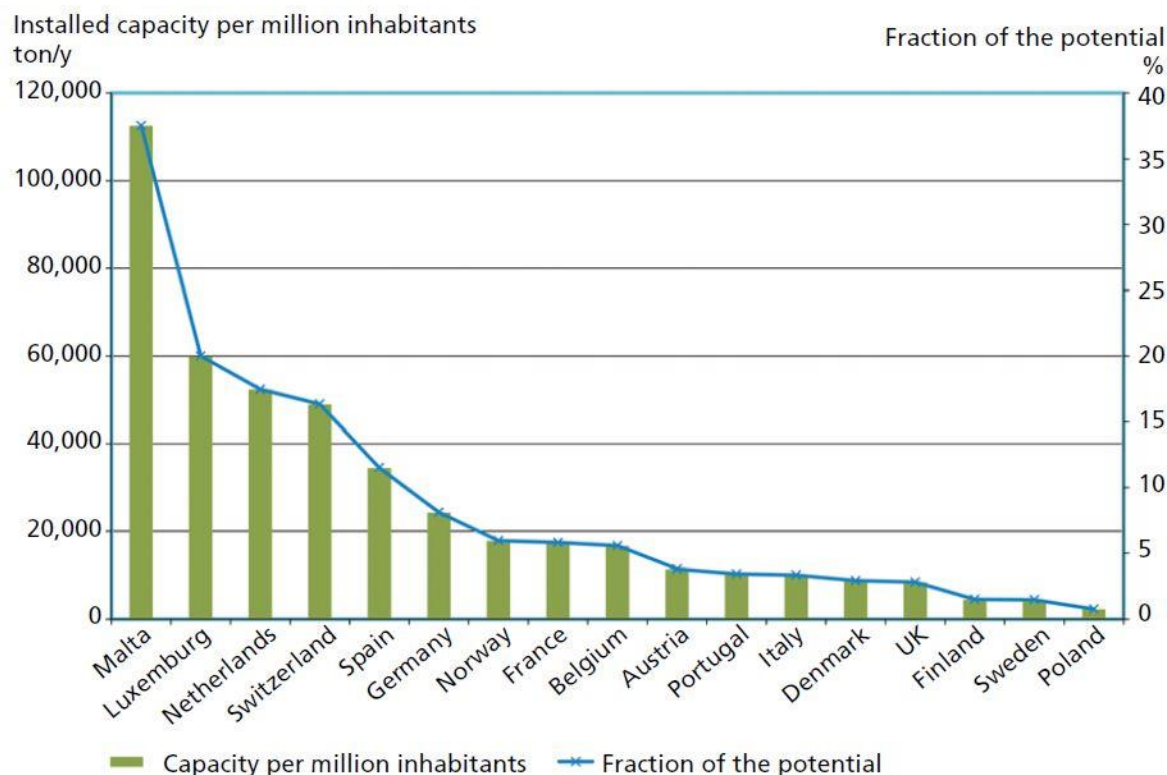


Gráfico 4 - Biodigestão de FORSU na Europa - Fonte De Baere, Mattheeuws, 2012

Esses dados são muito significativo em consideração do fato que o substrato FORSU (Fração Orgânica dos RSU), em função de sua composição extremamente variável e de suas características físico-químicas e biológicas em certo grau imprevisíveis, pode ser considerado o material orgânico de maior complexidade de gerenciamento do bioprocessamento responsável para produção de biogás. Contudo vemos países, como Holanda e Suíça, passar de 15% de todo potencial nacional tratado dessa forma, com a Alemanha passando de 7%.

Vale relembrar aqui que no Brasil a incidência da matéria orgânica no lixo urbano é superior àquela dos países desenvolvidos, chegando a uma média de 51,4 (MMA, 2012) com picos, por exemplo, de 64% em Caceres-MT e acima de 60% em cidades grandes como Belo Horizonte e inúmeras do interior, com caráter mais marcadamente rural. (OLIVEIRA ALCANTARA, 2010) Dessa grande quantidade de resíduo orgânico putrescível que compõe o montante dos RSU coletados no Brasil, estimado em 94.309 t/dia, somente 1,6% é hoje retirado de aterros e lixões para destinações mais adequadas como compostagem (IPEA, 2012a). Os números europeus, todavia, possíveis também

graça a uma sinergia com a organização da coleta seletiva, indicam que de um ponto de vista tecnológico há maturidade e os resultados são possíveis.

Perante essas projeções a nossa estimativa desse potencial, que será apresentada no final desse parágrafo, é muito mais prudencial por levar em conta questões mais estritamente mercadológicas e de viabilidade técnico-financeira. Todavia, se consideramos que países com menor disponibilidade de biomassas residuais como Alemanha e Itália já tem alcançado e ultrapassado esses níveis de instalação elétrica vindo de biogás, podemos considerar plenamente possível a projeção da EPE. A questão crucial é justamente a natureza distribuída desses recursos e a necessidade de pulverizar no território de projetos industriais de pequeno porte, que raramente poderão ultrapassar os 10 MWe instalados. O mesmo vale em caso de instalação de unidades de upgrading do biogás a biometano, pois será sempre o potencial da planta de produção de biogás que determinará o tamanho do empreendimento.

Nesse contexto se insere a questão primordial que justifica o presente estudo, que é a seguinte: relativamente ao aproveitamento desses abundantes recursos naturais renováveis, tanto em termos energéticos quanto de outros processos de gestão e gerenciamento, o compute da produção global e do potencial vindo de um somatório em nível federal ou estadual, na forma de macrodados, de pouco adianta em relação a projetos específicos, e pontuais, necessariamente localizado e mediante de pequeno/médio porte. A dizer: um mapeamento de natureza analítica e uma informação localizada (distribuída) desses recursos é primordial para que essas fontes de energia saiam do rol das intenções para começar a se concretizar em projetos pontuais. O somatório desses projetos, quando viabilizados por informações detalhadas sobre a disponibilidade de biomassa em localizações específicas, a nível pelo menos municipal, pode sim conferir à fonte biomassa moderna uma certa relevância nas futuras matrizes energéticas do país, tanto a elétrica quanto a primária no caso do upgrading a biometano, além de contribuir, e muito, para as diretrizes indicadas pela PNRS e o PLANSAB e outras externalidades.

A disponibilidade de dados analíticos beneficia todas as rotas tecnológicas para geração distribuída, como a queima, a pirolise e a gaseificação, assim como a rota objeto desse estudo, a biodigestão anaeróbia. O setor de biogás e biometano é incipiente no Brasil, tendo surgido já vários empreendimentos na área de captação do biogás de aterro e de

biodigestores de alto rendimento. Este segundo setor é eletivo em relação as biomassas modernas residuais, pois disponibiliza uma rota eficiente de aproveitamento do seu conteúdo energético, contribuindo paralelamente para o gerenciamento de resíduos sólidos e o saneamento ambiental, em ambiente urbano e rural.

Tentando modelar um prognóstico de desenvolvimento desse segmento, podemos nos nortear no que aconteceu na Europa, onde as políticas públicas incentivaram a correta disposição e o aproveitamento energético das biomassas modernas. Vemos na Figura. 9 e na Tabela 3 a incidência de fontes renováveis na Matriz Elétrica Alemã, que soma cerca de 25% dos 631 TW produzidos em 2103: aqui vemos uma incidência de quase 1% da fonte biogás/biometano.

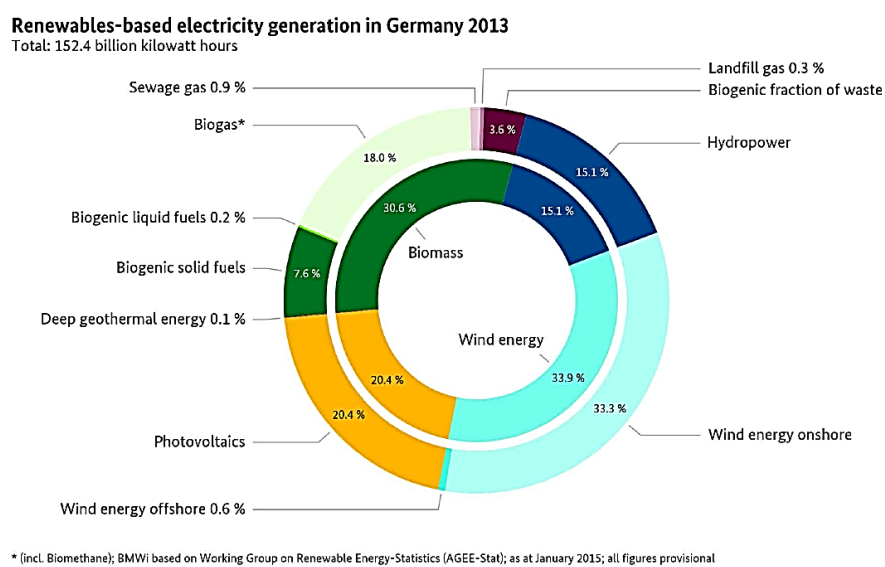


Fig. 9 - Geração elétrica renovável na Alemanha - Fonte IEA, 2015

Além dessa geração elétrica temos ainda 12,9 TWh térmicos gerados por biogás/biometano, que leva o montante total gerado no país por essa fonte até 30,9 TW, correspondente hoje a 5,4% da produção elétrica brasileira ⁵ (BEN 2013). Trata-se de um dado ainda mais relevante considerando que a disponibilidade de biomassa tradicional e moderna na Alemanha é muito inferior àquela disponível no Brasil. Na Itália, por exemplo,

⁵ Somamos, de forma um tanto indevida, os montantes elétricos e térmicos, em vista do fato que no Brasil muita refrigeração é produzida por via elétrica, enquanto que o potencial térmico, ao invés de ser usado por aquecimento, pode produzir refrigeração por meio da trigerção (CCHP Combined Cooling Heat & Power no lugar do CHP da cogeração, Combined Heat & Power).

tem se produzido em 2013 7,4 TWh de energia elétrica por biogás/biometano, 2,5% do consumo elétrico nacional, que é de 321,8 TWh/ano (GSE - GESTORE SERVIZI ENERGETICI, 2014), (TERNA GROUP/SISTAN, 2014).

Tabela 3 - Produção de bioeletricidade na Itália - Fonte GSE 2014

GWh	2013	2014	2014 / 2013 Variazione %
Biomasse	5.884,7	6.192,9	5,2
– <i>da frazione biodegradabile RSU</i>	<i>2.220,9</i>	<i>2.443,0</i>	<i>10,0</i>
– <i>altre biomasse</i>	<i>3.663,8</i>	<i>3.749,9</i>	<i>2,4</i>
Biogas	7.447,6	8.198,5	10,1
– <i>da rifiuti</i>	<i>1.621,1</i>	<i>1.637,9</i>	<i>1,0</i>
– <i>da fanghi</i>	<i>110,1</i>	<i>120,9</i>	<i>9,8</i>
– <i>da deiezioni animali</i>	<i>816,7</i>	<i>988,6</i>	<i>21,1</i>
– <i>da attività agricole e forestali</i>	<i>4.899,7</i>	<i>5.451,0</i>	<i>11,3</i>
Bioliquidi	3.757,8	4.341,1	15,5
– <i>oli vegetali grezzi</i>	<i>3.247,0</i>	<i>3.722,0</i>	<i>14,6</i>
– <i>da altri bioliquidi</i>	<i>510,8</i>	<i>619,1</i>	<i>21,2</i>
Bioenergie	17.090,1	18.732,5	9,6

Partindo da consideração desses dados, e posto que os governos brasileiros atuem as linhas programáticas dos grandes planos já existentes (PNRS, PLANSAB, PROINFA, etc.) com leis e decretos específicos, nos setores da incentivação, desoneração fiscal e alavancagem a nível municipal, podemos fixar como uma possibilidade realística e prudencial de 1% até 5% da Matriz Elétrica brasileira vindo de biogás até 2030, partindo do dado básico fornecido pelo BEN 2014 sobre a geração elétrica, conforme ilustrado na Figura 10:

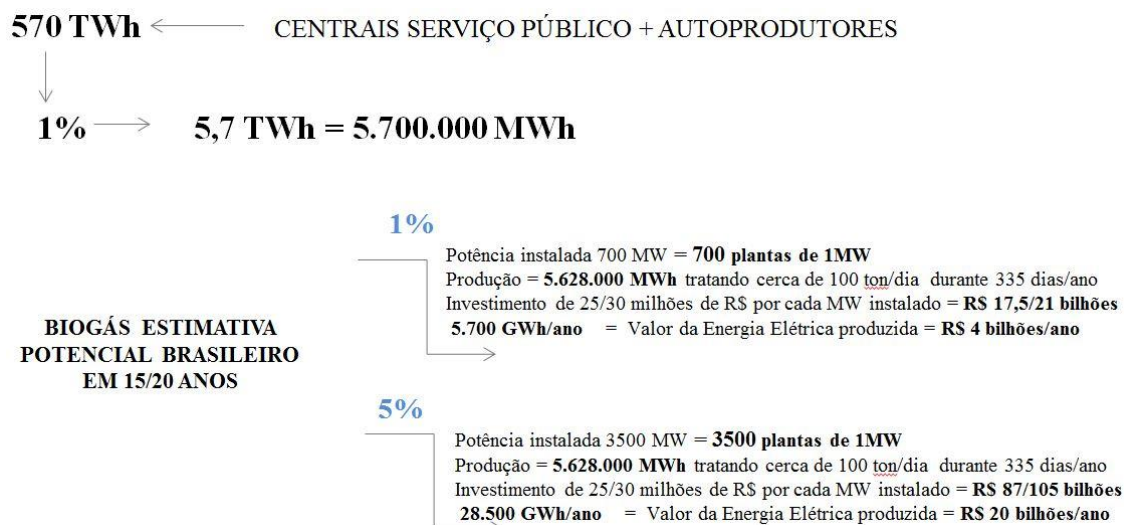


Figura 10 - Estimativa do potencial elétrico brasileiro com biogás – Elaboração própria

1.6 Objetivo da tese e justificativas

Devido aos argumentos listados anteriormente a proposta desse trabalho visa modelar uma ferramenta informática que auxilie o aproveitamento energético e relativa correta disposição de resíduos orgânicos, com foco na parcela putrescível ou volátil que constitui o substrato ideal para produção de biogás. O foco portanto do modelo de Base de Dados analisado e proposta é na rota da Biodigestão Anaeróbia, mas a modelagem poderá ser estendida a outras tecnologias de tratamento, com as devidas modificações, possivelmente até a integração em uma única base de dados para biomassa brasileira, incluindo também os montantes ligno-celulósicos e as culturas energéticas.

As razões expostas nesse capítulo introdutório sustentam a proposta de uma Base de Dados da Biomassa Residual Brasileira em função do processo da Biodigestão Anaeróbia. Como já notado, o termo *residual* indica que, no âmbito desse estudo, não serão levadas em conta biomassas que sejam insumos de processos produtivos existentes, nos setores agroindustrial e agropecuário (ex. milho e soja em grãos, grãos para rações), ou usadas como *matérias primas* (Ex. frutas e polpas de fruta, leite), nem tampouco aquelas que são cultivadas especificamente para usos energéticos (*Energy Crops* como milho, mamona, florestas plantadas). Esse corte não está ligado a limitações tecnológicas da biodigestão anaeróbia, haja vista que na Europa os *energy crops* dedicados para biodigestão têm tido

papel importante(citar fonte). Tampouco não implica uma exclusão desse caminho como opção de provisionamento de substrato para produção de biogás no Brasil. No caso das matérias primas (commodities) e dos *energy crops*, não abordaremos aqui a questão estratégica relativa ao emprego das biomassas para fins energéticos, a dizer a eventual competitividade entre usos energético, usos alimentares ou outros, ou seja os diferentes empregos das biomassas e possíveis rotas de colisão em relação ao uso da terra (*land use*). Adotamos aqui, todavia, uma postura que prioriza o foco na biomassa residual, considerando vantagens de competitividade (custo/benefício), ambientais (gerenciamento resíduos, saneamento e emissões de GEE), finalmente de complementariedade para com o uso da terra para fins de produção de alimentos. O amplo estudo publicado pela Unicamp sobre biomassa e energia nos suporta nessa postura quando afirma que: *a principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os resíduos gerados em todo o mundo são recurso de grande potencial para a obtenção de energia apenas sob uma adequada exploração* (BARBOSA CORTEZ, SILVA LORA, OLIVARES GÓMEZ, 2008). A biomassa classificada analiticamente no modelo de Base de Dados Relacional aqui proposto, será exclusivamente a sobra, como resíduos ou subprodutos, de processos produtivos dos setores agrícola, agropecuário, silvícola e da indústria de transformação, além do que resulta das práticas de saneamento ambiental e gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (R.S.U.). Portanto o único conflito que a proposta dessa Base de Dados poderá alimentar será relativo à comparação da Biodigestão Anaeróbia com outras tecnologias de disposição ou utilização dos resíduos orgânicos e dos subprodutos, como a disposição em aterro sanitário e as várias rotas alternativas que veremos em capítulo específico (pirolise, gaseificação, liquefação, queima ,etc.).

Vale aqui lembrar, a título de reforço das justificativas, que as fontes de dados localizados sobre disponibilidade de biomassa residual, abundantes em termos estatísticos (IBGE, etc.), são escassas e desorganizadas em termos pontuais. O empresário ou administrador público que quisesse hoje avaliar soluções e investimentos em plantas de produção de biogás, tem a disposição fontes de informação assistemáticas, ocasionais ou adaptadas às suas exigências. Um exemplo disso são a plataforma comercial genérica de oferta de resíduos B2Blue, onde a biomassa residual oferecida é incluída na categoria genérica de *orgânicos*, conforme visível no link: <http://www.b2blue.com/listar->

categoria/organicos/. Já o site MF Rural apresenta algumas ofertas de biomassa com potencial metanogênico, porém que ainda tenha algum valor comercial na forma de subproduto, como pode ser verificado no link: <http://www.mfrural.com.br/busca.aspx?palavras=biomassa>. Finalmente, a interessante proposta da IEE/USP para um Atlas de Biomassa oferece boas dicas e dados estatísticos sobre disponibilidade e natureza de biomassa residual, porém ainda não dados localizados sobre os montantes.

Por parte do poder público, conforme apresentado no Capítulo 2, há indicação de um cadastro informatizado de resíduos sólidos, o SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos, porém nada ainda foi tornado público ou disponibilizado sobre a natureza e características desse cadastro e seu grau de acessibilidade por parte de usuários privados ou administradores municipais.

2. POLÍTICAS PÚBLICAS, LEGISLAÇÃO, MARCOS REGULATÓRIOS

Em relação à necessidade e até obrigatoriedade de uma melhor gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos como um todo temos principalmente a Política Nacional de Resíduos Sólidos e seu relativo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, ambos PNRS. Esse plano, explicitamente, visa harmonizar-se com outros existentes, como o de Mudanças do Clima (PNMC), o de Recursos Hídricos (PNRH), de Produção e Consumo Sustentável (PPCS), de Saneamento Básico (PLANSAB). Não vamos nos delongar sobre a relevância do potencial poluente e do potencial energético dos resíduos sólidos gerados no Brasil, amplamente apontado pelo PNRS como por outras fontes. Vale nesse contexto relembrar a solicitação do PNRS em vista de um sistema de informação que facilite tanto a gestão quanto o gerenciamento dos resíduos. Na página 6 esse plano afirma que: “*O Diagnóstico baseou-se exclusivamente em dados secundários, preferencialmente obtidos de fontes oficiais de âmbito nacional. Esta opção conduziu para uma sinalização da necessidade de obtenção de um número maior de informações, dados que apresentem maior confiabilidade, pesquisas a serem produzidas em intervalos menores de tempo, além de estudos adicionais específicos ou setoriais*”. Com isso está apontado o convite para implementação de sistemas informáticos sobre o assunto. Logo em seguida o plano aponta para relevância, nesse contexto, do SINIR: “*Neste tocante, merece especial atenção a construção de um Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – Sinir, importante instrumento da PNRS, previsto na lei 12.305/2010 e detalhado no Decreto 7.404/2010. O Sinir será implementado até o final de 2012 e conterá informações fornecidas pelo Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos, Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais, Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental, pelos órgãos públicos responsáveis pela elaboração dos planos de resíduos sólidos, por demais sistemas de informações que compõem o Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente – Sinima e pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico – Sinisa, no que se refere aos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos*”. Relativamente à escolha do Comitê Interministerial de adotar a cenarização proposta pelo PLANSAB, em específico o Cenário 1, vale salientar nesse contexto a

hipótese IV: “*Desenvolvimento de tecnologias apropriadas e ambientalmente sustentáveis*”.

Outra referência que observamos nessa proposta é a Norma Brasileira ABNT NBR 10004, para conferência de que todos os dados cadastrados nessa base de dados refiram-se necessariamente a Resíduos Classe IIA, Resíduos não perigosos não inertes. Além disso os resíduos cadastrados deverão ser isentos de Resíduos Perigosos de Fontes Específicas e Não Específicas (ABNT, 2004, Anexos A e B) , de Substâncias que Conferem Periculosidade aos Resíduos (ABNT, 2004, Anexo C) e de Substâncias Tóxicas (ABNT, 2004, Anexo E).

Relativamente aos sistemas de tipificação e classificatórios dos resíduos, harmonizamos essa base de dados à Lista Brasileira de Resíduos Sólidos, presente na Resolução Normativa n.13/2012 do IBAMA, limitadamente à parcela orgânica que interessa a biodigestão anaeróbia.

Nessa base de dados também é contemplado o sistema de codificação da Resolução n. 313/2002 do CONAMA, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Essa resolução parte das premissas da necessidade de *Programas Estaduais e do Plano Nacional para Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais* e da consideração da *ausência de informações precisas sobre a quantidade, os tipos e os destinos dos resíduos sólidos gerados no parque industrial do país* e de que *esses resíduos podem apresentar características prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente*. Existe portanto uma limitação nessa resolução, porque, ao considerar somente os aspectos do potencial poluente e da periculosidade, excluí do cadastro previsto atividades industriais que tem, em seus resíduos, grande potencial energético. Além disso a Resolução, por motivos operacionais que aqui não abordamos, de fato tem sofrido um descumprimento generalizado. Todavia, no aguardo de novas resoluções, adotamos nessa proposta o sistema de codificação previsto por essa resolução, relativamente aos resíduos industriais, quando cabível.

O código CNAE também é puxado automaticamente pelo sistema na hora de cadastrar dados, para identificação da atividade econômica produtora dos resíduos. A mesma coisa vale para os Códigos CNAEs disponibilizados pelo IBGE, que são associados automaticamente em função da atividade geradora dos resíduos cadastrados. Finalmente um

código próprio é gerado pelo sistema, que possibilita a classificação diferenciada dos quase 200 substratos diferentes, todos compatíveis com a tecnologia em questão (outros sistemas de codificação preexistentes podem ser repetitivos, agrupando substratos diferentes).

Esse esforço de harmonização com os sistemas classificatórios vigentes, além de devido, aponta para a possibilidade de uma extensão da base de dados a outros contextos tecnológicos, o que seria desejável, sem muita perda de homogeneidade.

Relativamente à questão energética e à oferta descentralizada de energia, atrelada ao destino dos resíduos sólidos, temos planos e estudos que apontam para oportunidade de promover o biogás e biometano. Citando a Nota Técnica 13/14, Demanda de Energia 2050 (EPE/MME, 2014): *O atendimento da demanda de energia, a custos sócio, ambiental e economicamente viáveis, é o problema núcleo do planejamento energético e, historicamente, esse problema vem sendo resolvido através da expansão da oferta centralizada de energia. Isso é consequência principalmente das economias de escalas alcançadas com os grandes projetos. Contudo, a questão da perda de capacidade de investimento do estado, das grandes quantidades de recursos necessários para os grandes projetos centralizados, da introdução do gerenciamento da demanda, da maior concentração populacional em grandes centros urbanos, das fontes renováveis de menores escalas e, a integração cada vez maior dos sistemas de energia aumenta a perspectiva de uma maior participação da oferta descentralizada de energia no atendimento da demanda.* Relativamente à participação de biogás e biometano nesse quadro de evolução distribuída a mesma nota salienta que: *Neste cenário o biogás apresenta uma série de vantagens, pois é um energético flexível tanto no uso, podendo ser convertido em eletricidade, injetado na rede de gás após tratamento, ou usado como combustível, como na produção, podendo ser produzido a partir de resíduos rurais, urbanos e industriais. Essa característica sinaliza um grau de descentralização na produção e uso de combustíveis que introduz um fator de inovação no setor energético.* Finalizando a contribuição dessa nota técnica à questão da biodigestão anaeróbia, citamos o trecho relativo ao biometano: *Dado cenário de maior pressão para mitigação de impactos locais e globais da destinação inadequada de resíduos, o desenvolvimento do mercado de serviços de energia, e a difusão do uso da tecnologia de digestão anaeróbica, a produção do biometano fica condicionada a competição pelo uso do biogás. A competitividade do biometano em relação aos*

combustíveis líquidos, a destacar diesel e gasolina, e mesmo em relação ao gás mostra-se mais vantajosa que a geração de eletricidade. Junto a essa competitividade, observa-se existir demanda localizada junto aos potenciais centros produtores de biometano, fazendo com que a escolha pela produção de biometano seja a mais interessante.

O Plano de Energia 2030, também curado pela EPE ainda em 2007 (EPE, 2007) já apontava naquela época o futuro promissor dessa fonte de energia distribuída. Só em relação ao Resíduos Sólidos Urbano (RSU) esse estudo apontava um potencial de geração elétrica, somando biogás de aterro e biodigestão anaeróbia, de quase 2,7 GWe instalados em 2020 e de 3,8 GWe instalados em 2030, conforme a Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Potencial de geração elétrica com biogás - Fonte EPE , 2007

	2020	2030
Características dos resíduos		
Volume (milhões de toneladas por ano)	62,7	92,2
% de material orgânico	56,0	47,5
% de material reciclável	39,0	47,5
Potencial de geração de eletricidade¹ (MW)		
Biogás de aterros	1.700	2.600
Digestão anaeróbica	980	1.230
Incineração	3.740	5.280
Ciclo combinado otimizado	5.980	8.440

¹ Considerando fator de capacidade de 80%

Relativamente às fontes energéticas provenientes do agroindústria, pecuária e resíduos industriais, ainda em 2007 o mesmo estudo apontava o seguinte: *O aproveitamento dessas fontes ainda está em fase incipiente, tecnologicamente comparável à da geração eólica de 10-15 anos atrás, porém vem despertando interesse pelo pequeno impacto ambiental, grande previsibilidade, alta densidade energética e amplas perspectivas de evolução técnica.* Nos 10 anos que se passaram desde essas considerações, a implantação dessas tecnologias no Brasil, principalmente biogás de aterro e biodigestão anaeróbia, passou da fase incipiente para fase inicial, como demostram varias plantas já em operação no país.

Em 2012 a Resolução Normativa 482 (ANEEL, 2012) abre o caminho para o sistema de geração e distribuição elétrica no modelo do *net metering*, com o objetivo de reduzir barreiras para conexão de pequenas centrais geradoras na rede de distribuição, desde que se utilizem de fontes renováveis de energia ou cogeração qualificada. Essa chamada Lei da Micro e Minigeração viabiliza de fato a comercialização da energia elétrica produzida dessa forma ao mesmo valor de mercado estabelecido pelas distribuidoras, sem que com a limitação ligada ao sistema de créditos. São nesse sentido aguardadas medidas de incentivação que estendam essa possibilidade ao âmbito do ACL, o Mercado Livre de Energia e ao âmbito dos Leilões de Energia no ACR, o Mercado Cativo⁶ (ABIOGAS, 2015). De qualquer forma, a Resolução Normativa 687 de 2015 (ANEEL, 2015), amplia o poder de alcance do sistema de net metering, para as fontes alternativas e cogeração qualificada, até 5MWe instalados no caso da Minigeração. Além disso facilita de várias maneiras o procedimento burocrático para esse tipo de conexões, em relação aos Módulos 1 e 3 dos Procedimento de Distribuição – PRODIST. Finalmente, no Art.1 que trata das alterações ao Art. 2 da Res. Norm. 482/2010 possibilita três novas soluções que abrem o leque das possíveis soluções financeiras e de participação de múltiplos atores nos empreendimentos de geração distribuída: no Inciso VI prevê o *empreendimento com múltiplas unidades consumidoras*; no Inciso VII a figura da *geração compartilhada*; no Inciso VIII a possibilidade do *autoconsumo remoto*. Com isso muitos empreendimentos têm se tornados possíveis, com predominância, porém, das aplicações fotovoltaicas de pequeno porte (entre 3 e 10 KWe instalados). Os empreendimentos com biogás são hoje cerca de 30 que tem se beneficiado desse quadro normativo, de porte pequeno entre 50 e 250 KWe instalados (ANEEL, 2017). Resta, no âmbito dessas resoluções, a lacuna relativa à consideração do peso e das relativas vantagens que elas comportam para as distribuidoras: por um lado se faz necessário que as adequações tecnológicas e o custo financeiro ligado ao sistema de incentivação não caia na conta econômica das distribuidoras, sendo essas medidas em prol da sociedade e portanto de competência do balanço da União. Apesar

⁶ O Leilão para Energia de Reserva/2017, A-3 da ANEEL, publicado em outubro de 2014, fixou o preço máximo ofertado de cento e sessenta e nove reais por megawatt hora (R\$ 169,00/MWh) para a geração com biogás/biometano. Esse valor ainda não é competitivo para empresas que queiram entrar no mercado de energia elétrica de biogás/biometano, faltando o computo das externalidades positivas ligadas a esse tipo de geração. Já no ACL-Mercado Livre e no âmbito da Mini e Microgeração, há hoje espaço para um retorno do investimento (ROI) minimamente atrativo.

disso as distribuidoras estão em parte enxergando nessas resoluções também uma possibilidade de negócios e de adequação de seus serviços em certas áreas com injeção na rede dessas fontes de energia distribuída, como demonstra, por exemplo, a formação, já no ano 2000, da Light ESCO, sucessivamente integrada com a Light COM em 2013, no estado do Rio de Janeiro (GRUPO LIGHT, 2016). Por outro lado os legisladores e os *stakeholders* envolvidos estão trabalhando para que num futuro próximo a geração distribuída possa ingressar com possibilidade de sucesso o mercado da contratação livre de mercado denominado de ACL – Área de Contratação Livre.

A Resolução Normativa 77/2004 concede desconto de 100% das tarifas únicas de Distribuição e Transmissão, TUSD e TUST, aos empreendimentos baseados em biogás (ANEEL,2004).

Uma nota técnica foi apresentada em 2015 à Secretaria de Planejamento Energético do MME, solicitando a formação de um grupo de trabalho interministerial para trabalhar um Programa Nacional do Biogás e do Biometano tendo como coordenação o MME.

O Quadro 1 apresenta sinoticamente o conjunto de Leis, Normas, etc., que, de alguma forma, dizem respeito à facilitação para o ingresso dessa fonte na Matriz Energética brasileira:

Quadro 1 – Leis e Normas relacionadas ao biogás – Elaboração própria

ORGÃO	LEIS	DOCUMENTOS	NOTAS	HIPERLINK
ANEEL	Resolução Normativa Nº 166, de 10 de Outubro de 2005		Estabelece as disposições consolidadas relativas ao cálculo da tarifa de uso dos sistemas de distribuição (TUSD) e da tarifa de energia elétrica (TE).	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2005166.pdf
ANEEL	Resolução Normativa 77/2004.		Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000 kW	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2004077.pdf
ANEEL	Resolução n. 21 / 2000		Estabelece os requisitos necessários a qualificação de centrais cogeneradoras de energia e dá outras providências.	http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-eselsa/informacoes/grandes-clientes/legislacao/Documents/resolu%C3%A7%C3%A3o%20021-00.pdf
ANEEL	n. 235/2006		Cogeração Qualificada	
ANEEL	Regulação do Sistema Elétrico Distribuição-PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional	9 Módulos	http://www.aneel.gov.br/prodist
ANEEL	Resolução Normativa 482/2012		Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf
ANEEL	Resolução Normativa 517/2012		Altera a Resolução Normativa 482/2012	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf
ANEEL	Resolução Normativa		Altera a Resolução Normativa 482/2012	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf
GOVERNO FEDERAL	Lei 9.074/1995		Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos - Produtores independentes de EE	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm
GOVERNO FEDERAL	Lei 8.987/1995		Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal,	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987cons.htm
GOVERNO FEDERAL	Lei Kandir n.87/96		Proíbe ICMS em transações interestaduais de energia elétrica e petróleo	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp87.htm
GOVERNO FEDERAL	Lei 9478/97		Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm
ANP	Resolução 8 DE 30/01/2015		Define as especificações, as regras de utilização e o controle de qualidade do biometano, em relação ao GN e GNV	http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=02/02/2015&jornal=1&pagina=100&totalArquivos=156
ELETROBRAS	Portaria Interministerial 1.877/1985		PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica	
GOVERNO FEDERAL	Lei 10.848/2004	ACL - Mercado Livre de Energia	Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997,	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei200410848.pdf
GOVERNO FEDERAL	Decreto 163/2004.	ACL - Mercado Livre de Energia	Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/ds163.HTM
GOVERNO FEDERAL	Lei 10.295/2001	PNE - Plano Nacional de Energia	Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências.	http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm
MME - Ministério de	Portaria 44/15		Estimula a geração de energia elétrica conectada à rede de distribuição, pelos microgeradores a diesel e a gás natural, utilizados como fonte de backup e para geração em horário de ponta,	http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt2015044mme.pdf

3. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA E RESÍDUOS ORGÂNICOS

3.1 Descrição geral da tecnologia

A degradação biológica em condições de anaerobiose de uma ampla gama de substratos orgânicos descritos e classificados nessa Base de Dados determina a decomposição das macromoléculas orgânicas em entrada (lipídios, proteínas e carboidratos) com produção abundante de um gás composto principalmente por metano, CH₄, e Dióxido de Carbono, CO₂, em proporções variáveis entre 50% e 70% de metano. Essa condição definida de anaerobiose se determina em alguns ambientes naturais como pântanos ou acúmulos artificiais de resíduos (aterros e lixões), como também em situações de confinamento artificial como em biorreatores e tanques estanques: a atmosfera na qual a vida em nível microbiológico se desenvolve apesar de ser definida anaeróbia, contem pequenas quantidades de ar ou oxigênio. Os microrganismos responsáveis, através de um específico metabolismo, pela produção do biogás, pertencem a uma família chamada de Arquea, entre as mais antigas existentes na terra. Comumente esses microrganismos são chamadas de bactérias metanogênicas, apesar de se tratar de fato de um domínio autônomo (WOESE, KANDLER, WHEELIS, 1990), morfologicamente semelhante ao das bactérias por serem unicelulares e marcados pela ausência de um núcleo separado por uma membrana. As Arquea convivem de fato no processo fermentativo anaeróbio com uma grande quantidade de outros filos bacterianos, entre as quais varias famílias de bactérias facultativas que, podendo proliferar tanto em ambiente anaeróbio como aeróbio, consomem aquelas pequenas quantidades de oxigênio que seriam letais para as Arqueas.

De fato a produção do metano pelas Arqueas é somente a última fase de um processo integrado e complexo que se compõe de 4 fases, resumidas nas Figuras 11e 12:

- a. Hidrólise. A primeira etapa para a maioria dos processos de fermentação, na qual o material particulado composto por polímeros de proteínas, lipídios ou carboidratos é convertido em compostos solúveis que podem então ser hidrolisados em monômeros simples que são utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação, é chamada de hidrólise.
- b. Acidogênese. No processo de fermentação, aminoácidos, açúcares e alguns ácidos graxos são degradados. Os substratos orgânicos servem tanto como doadores como aceptores de

elétrons. Os principais produtos da fermentação são acetato, hidrogênio, CO₂ e propionato e butirato. O propionato e o butirato são fermentados posteriormente para também produzir hidrogênio, CO₂ e acetato. Os produtos finais da fermentação (acetato, hidrogênio e CO₂) são, portanto, os precursores para a formação de metano na metanogênese.

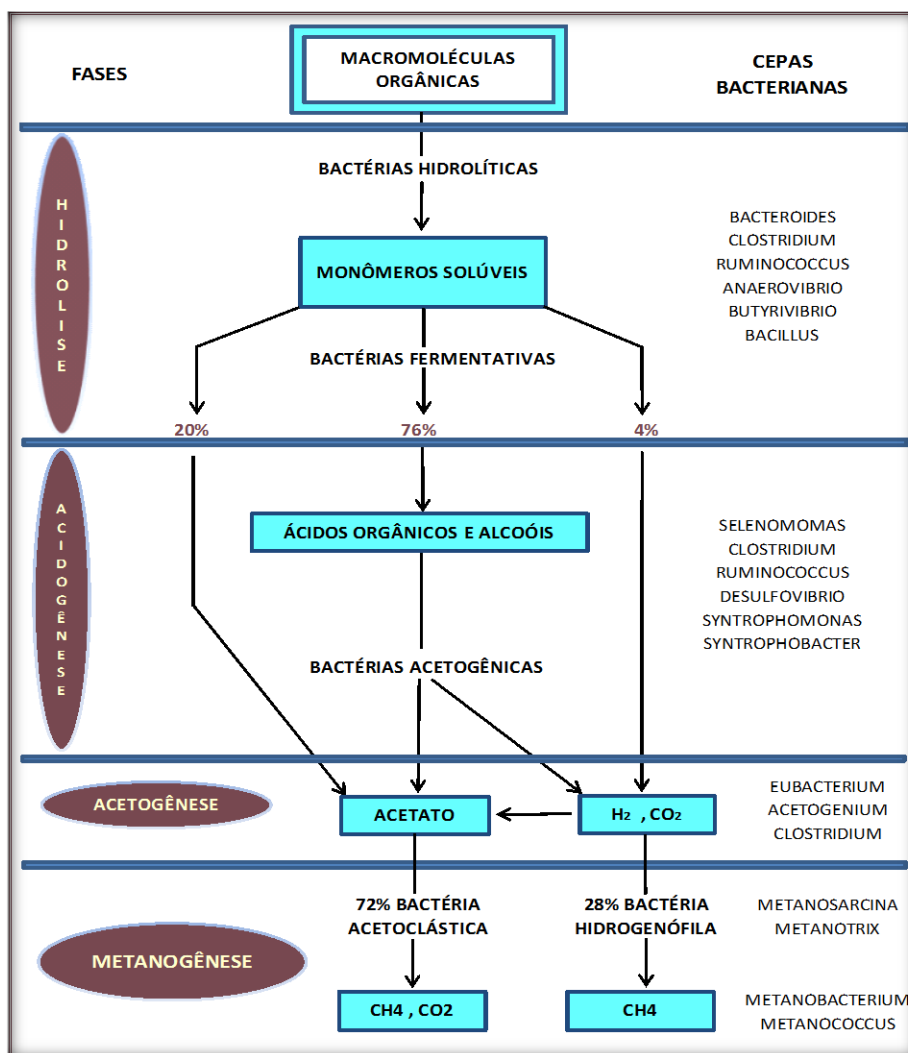


Figura 11 – Bioquímica da produção do biogás - Fonte elaboração própria

- c. Acetogênese. Fase sucessiva onde a partir dos ácidos graxos ocorre a formação de ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio molecular.
- d. Metanogênese. Fase em que Dois grupos de organismos metanogênicos estão envolvidos na produção de metano. Um grupo de bactérias, as metanógenas acetoclásticas, convertem o acetato em metano e dióxido de carbono. Um segundo grupo de bactérias utiliza hidrogênio

como doador de elétrons e o CO₂ comoceptor de elétrons para produzir metano. Bactérias dentro dos processos anaeróbicos, denominadas acetógenos, também são capazes de utilizar o CO₂ para oxidar o hidrogênio e produzir ácido acético.

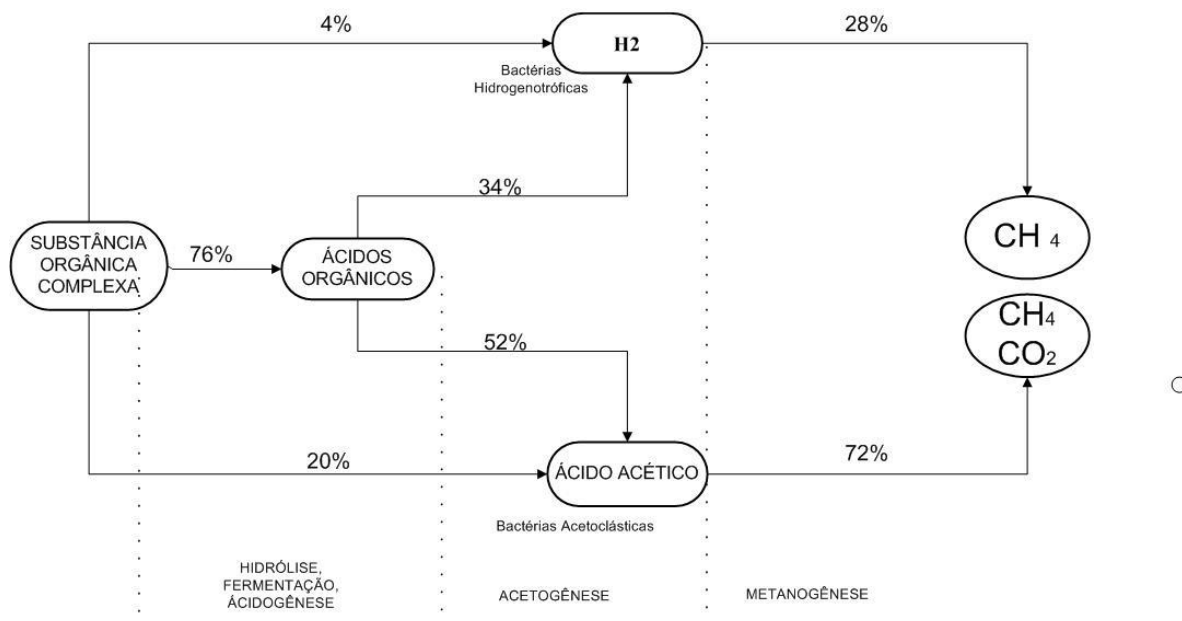


Figura 12 – Bioquímica da produção do biogás - Fonte elaboração própria

O processo descrito na Fig. 12 de forma geral de fato pode estar sujeito a grande variabilidade dependendo do ambiente em que se desenvolve (natural ou artificial) e, no caso de um ambiente artificial constituído por uma planta de biodigestão anaeróbia com seu(s) relativo(s) biodigestores. O primeiro fator que incide sobre o processo é o conteúdo de água do substrato que, em sua variabilidade, determina três forma básicas de processo:

a. Biodigestão em regime úmido (Wet). Foi a primeira a ser utilizada em decorrência dos conhecimentos ligados às atividades de tratamento dos lodos nas estações ETEs e ETRAs, onde o teor de sólidos é inferior a 10%. Nas Figuras 13 e 14 vemos um exemplo de usina de biodigestão anaeróbia em sistema *wet*, alimentada em contínuo. Essa tecnologia é usada em larga escala em ambiente rural para tratar resíduos com elevado conteúdo de água como os dejetos suínos ou outros resíduos industriais como vinhoto e efluentes de cervejarias.



Figura 13 – Usina de biogás - Fonte Ideegreen 2017



Figura 14 – Usina de biogás - Fonte Schmack Biogas

- b. Biodigestão em regime semi-seco (Semi-dry). Opera com um conteúdo de sólidos entre 15 e 20%, adotando o sistema de biorreatores CSTR, *Completely Stirred Tank Reactors*, operando tanto em regime de temperatura mesófilo (20-45 C°) quanto em termófila (50-52 C°).
- c. Biodigestão seca (Dry). O teor de sólidos do substrato si situa no intervalo 25-40%, o que não comporta variações significativas do ponto de vista bioquímico e microbiológico, mas

sim em termos gestão física do substrato dentro do biodigestor (misturação, etc.) e formato do biodigestores (garagens, etc). Em caso de resíduos que são produzidos com esse teor de água, como por exemplo dejetos equinos , grama e restos vegetais ou alimentares, pode ser indicado esse sistema em batelada que dispensa uso intensivo e relativas plantas de tratamento de água, simplificando o processo e o gerenciamento da planta. Nas Figuras 15 e 16 são representados exemplos da rota *dry*:



Figura 15 – Layout de usina *dry digestion* - Fonte Bekon, Layout oferta comercial, 2016



Figura 16 – Layout de usina *dry digestion* - Fonte Mueller GMBH, Arquivo comercial, 2016

A partir dessas grandes distinções de processo entramos na definição dos principais parâmetros que permitem de dimensionar, avaliar e gerenciar o processo da biodigestão anaeróbia de alto rendimento. Tais parâmetros podem ser separados em dois grupos: parâmetros de gerenciamento do biodigestor e parâmetros de estabilidade do processo.

a. Parâmetros de gerenciamento do biodigestor.

Definem o funcionamento do digestor em termos de tempo de permanência da biomassa no reator (TRH – Tempo de Retenção Hidráulica), de concentração de micro-organismos, de rendimento de biogás em relação ao volume do biodigestor e às características do substrato tratado. A biomassa substrato é normalmente definida em termos de:

- Sólidos Totais –ST, o conteúdo de substância seca determinado por método laboratorial de exsicação em forno a 105 C° durante 24 horas.
- Sólidos Voláteis – SV, parcela da substância seca que volatiliza durante a combustão a 550 C° por um período definido pela estabilização do peso da amostra.
- DQO – Demanda Química de Oxigênio, a quantidade de oxigênio consumida pela oxidação da substância seca, determinada por método laboratorial com uso de um forte agente químico oxidante ($K_2Cr_2O_7$) em ambiente ácido.
- DBO₅ – Demanda Bioquímica de Oxigênio, quantidade de oxigênio consumida durante 5 dias em condições controladas devido à oxidação biológica da substância orgânica presente na amostra.
- DBO_L – Demanda Bioquímica de Oxigênio durante 20 dias.

Já o parâmetros propriamente de gerenciamento do biodigestor são:

- TRH – Tempo de Retenção Hidráulica, definido como a relação entre o volume útil do reator e a vazão de alimentação com substrato
- SRL – Tempo de Retenção dos Lodos, que é a relação entre a massa total dos sólidos presentes no reator e a quantidade de sólidos extraídos do próprio reator.
- TCO – Taxa de Carregamento Orgânico, que é a volume de carga de substrato em termos de quantidade de substrato em entrada em relação ao volume do reator e ao tempo.
- CB – Carregamento de Biomassa, definida como a quantidade de sólidos voláteis (SV) presentes no reator na unidade de tempo
- PEG – Produção Específica de Gás, que é a quantidade de gás que é produzida em relação à quantidade de substância volátil que alimenta o biodigestor.

- VPB – Velocidade de Produção de Biogás, que é a vazão de biogás produzido em relação ao volume do reator e ao tempo.

- Eficiência de remoção do substrato digerido.

b. Parâmetros de estabilidade do processo.

São relativos ao monitoramento do processo e ao estado de saúde de biorreator:

- pH, que fornece uma indicação da estabilidade do meio de reação, a ser mantida entre 6,5 e 7,5, sendo fortemente influenciado pela presença de CO₂ no meio em digestão.

- Alcalinidade, que é a capacidade de um sistema líquido de neutralizar ácidos fracos e deve ser mantida entre 3000 e 5000 mg de CaCO₃ por litro.

- Ácidos graxos voláteis, representados pela fórmula geral CH₃(CH₂)_n – COOH, geralmente definido em termos de concentração de ácido acético e que depende do tipo de substrato tratado, variando entre 200 e 2000 mgAc/litro.

- Relação ácidos graxos voláteis vs. alcalinidade, onde valores por volta de 0,3 indicam uma operatividade estável do biodigestor, enquanto que valores superiores podem apontar para o surgimento de problemas de estabilidade. Os ácidos graxos são expressos em termos de ácido acético e a alcalinidade em termos de carbonato de cálcio.

- Produção e composição do biogás, que em caso de estabilidade de funcionamento do biodigestor resultam constantes.

- Conteúdo de hidrogênio do biogás.

- Temperatura, pois as Arques são muito sensíveis a variações térmicas, que na ordem de 2/3 C° podem prejudicar o desempenho do processo em produção de biogás. Para os filos mesófilos a temperatura ideal varia entre 30 e 35 C°, para os termófilos entre 40 e 60 C°.

3.2 Substratos do processo: resíduos orgânicos e biomassa residual

São, por definição, resíduos sólidos, materiais e objetos sólidos, semissólidos ou líquidos ⁷ que, aos olhos de seu gerador, perderam qualquer utilidade e valor. Na alçada de seus conhecimentos, recursos financeiros e tecnológicos, os produtores desses resíduos não enxergam outra solução que não seja a devolução desses montantes ao meio ambiente, na forma de lixões e aterros sanitários civis e industriais. Não é infrequente também o despejo

⁷ Conforme a definição 3.1 da ABNT-NBR 10004/2004 são resíduos sólidos também os semissólidos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição e os líquidos cuja natureza impede o despejo na rede pública de esgoto ou corpos de água

desses montantes em locais proibidos. Já a parcela orgânica dos resíduos, volátil ou biodegradável, é o que resta da utilização recente de seres vivos (plantas ou animais). A origem desses resíduos está ligada, primariamente, aos processos fotossintéticos e de regeneração vegetal (madeira, grama, folhas, etc.), secundariamente, aos processos de alimentação e digestão animal (inclusive humana). Ou seja, os sistemas metabólicos do reino vegetal (fotossíntese e respiração) e do reino animal (digestão e respiração) estão intimamente ligados à produção de matéria orgânica volátil, que eventualmente se torna resíduo ⁸. A diferença está no fato que, em nível de ecossistemas naturais, há um ciclo funcional de transformação dos resíduos orgânicos, enquanto que a produção oriunda de atividades humanas aglomeradas ou industrializadas produz montantes que o ecossistema natural, por si só, não consegue mais metabolizar. Com isso definiu-se que o potencial poluente dos resíduos sólidos originados pelas atividades humanas é, em grande parte, ligado à componente orgânica, por sua vez ligada a porcentagem de água neles contida. Os termos básicos, nesse contexto, são: *biomassa*, *biomassa residual* e *resíduos orgânicos*. Biomassa, de uma forma muito geral, é a massa de todos os seres vivos (VERNADSKI,1997), podendo se tornar *residual* quando, após a morte deles dentro de determinados processos ecológicos, socioeconômicos ou de produção industrial, se torna algo que aparentemente foge de qualquer possibilidade de emprego como insumo ou subproduto com valor comercial. *Biomassa* também é o petróleo, sendo que o tempo e as condições que intercorreram desde a morte dos seres vivos que o originaram, tornaram sua natureza fóssil. Distinguimos portanto entre *Biomassa Fóssil* (petróleo, gás e carvão) ⁹, *Biomassa Tradicional* (madeira, bagaço de cana, outros lignocelulósicos) e *Biomassa Moderna* (FORSU, dejetos animais, resíduos orgânicos da indústria e agropecuária, lodos de ETEs e ETRAs, etc.). As componentes da *Biomassa Moderna* são as que mais interessam a biodigestão anaeróbia, pois as frações lignocelulósicas que predominam na composição da *Biomassa Tradicional* são de difícil digeribilidade pelo grupo de seres vivos

⁸ A questão da formação e transformação da matéria orgânica, juntamente com a das fontes energéticas, está diretamente ligada ao fenômeno do aquecimento global, por meio dos conceitos do ciclo do carbono, fotossíntese, produção e transformação da CO₂ e outros gases de efeito estufa (GEE) e Produção Primária Líquida (PPL) (MAPA/EMBRAPA, 2016).

⁹ O interesse que desperta a biomassa moderna depende principalmente de seu grande potencial poluente e, contextualmente, do potencial energético nela armazenado, ainda pouco explorado.

responsáveis pela produção do biogás, chamados de bactérias metanogênicas ¹⁰. A *biomassa moderna*, incidentalmente, é a que mais interessa as questões de gerenciamento dos resíduos, pelas características de suas componentes (RSU- Resíduos Sólidos Urbanos; dejetos, esgoto, restos de alimentos, etc.) que mais contribuem para poluição do meio ambiente. Já a biomassa tradicional tem seu emprego energético bem assentado na história da humanidade (lenha e carvão vegetal) assim como no presente das matrizes energéticas mundiais, além de seu potencial poluente não ser tão grande, em termos de resíduos. Alguns dados estatísticos ajudarão na compreensão da contribuição da *Biomassa Moderna* para poluição do meio ambiente e de seu potencial energético:

- Cerca de 40 milhões de toneladas/ano de resíduos sólidos urbanos de natureza orgânica coletados em 2014, aproximadamente 51% do total, destinados a lixões, principalmente, além de aterros controlados e aterros (ABRELPE, 2014).
- Cerca de 10 milhões de toneladas/ano de resíduos industriais orgânicos gerados só no estado de Minas Gerais em 2009 (IPEA, 2012b).
- Cerca de 150/200 milhões de toneladas/ano de lodo de tratamento de esgoto (ETEs), geradas em 2010, resultantes do 30% do esgoto urbano que no Brasil é tratado. Um potencial portanto de mais de 400 milhões de toneladas/ano de lodos, caso todo esgoto hoje lançado em corpos d'água fosse também tratado (PEDROZA ET AL., 2010).

Outras estimativas são oferecidas sobre o potencial em biogás contido nos resíduos brasileiros, em relação a biomassa moderna. A Tabela 5 mostra o potencial relativo ao tratamento de esgoto e lodos nas principais estações de tratamento de efluentes (ETEs) da região sudeste, ainda em 2009 (ZANETTE, 2009). Relativamente à viabilidade dessa tecnologia de tratamento do esgoto em unidades públicas veja, a título de exemplo, a experiência na estação de tratamento da Sabesp na ETE de Barueri, a maior da América Latina. (TEXEIRA COELHO ET AL., 2006).

¹⁰ As comumente definidas bactérias metanogênicas são, a rigor, um grupo similar às bactérias, até 1990 chamadas de Achaebacterias e classificadas, sucessivamente, como um domínio autônomo, denominado Archaea (WOESE C.R, KANDLER O., WHEELIS M.L., 1990).

Relativamente aos resíduos sólidos urbanos (RSU) dos principais aterros sanitários, o mesmo estudo avalia um potencial de recuperação na ordem de 3800 milhões de metros cúbicos de metano, possibilitando a instalação de 422 MW médios de energia elétrica, resultado da disposição de mais de 17.700 milhões de toneladas de resíduos por ano (ZANETTE, A.L., 2009).

A extração de metano dos aterros, considerada nessa estimativa, tem um rendimento muito inferior em biogás, que se gera espontaneamente nos aterros, se comparado com sistemas de tratamento anaeróbio dos RSU a 60/90 m³CH₄/ton de resíduo tratado.

Tabela 5 – Pôtençial em biogás esgoto e lodos - Fonte Zanette, 2009

ETE	População atendida (mil hab.)	Capacidade de tratamento (m ³ /s)	Tipo de tratamento	Digestor	Produção de CH ₄ (mil m ³ /dia)	Geração de eletricidade (MWmed)
Barueri – SP	4400	9,5	Aeróbico	Anaeróbico	107	13,3
ABC – SP	1400	3,0	Aeróbico	Anaeróbico	34	4,2
São Miguel – SP	720	1,5	Aeróbico	Anaeróbico	17	2,2
Suzano – SP	720	1,5	Aeróbico	Anaeróbico	17	2,2
Alegria – RJ	1500	5,0	Lodo ativado		36	4,5
Penha – RJ	580	1,6	Lodo ativado		14	1,8
Ilha do Governador – RJ	240	0,5	Lodo ativado		6	0,7
Pavuna – RJ	410	1,0	Decantação		10	1,2
Sarapuá – RJ	430	1,0	Decantação		10	1,3
São Gonçalo – RJ	235	0,7	Lodo ativado		6	0,7
Belo Horizonte – MG	1000	1,8	Anaeróbico (UASB)		48	6
Sabará – MG	1000 - 1600	2,3 - 4,5	Aeróbico	Anaeróbico	32	3,9
Total					338	42

No caso da separação mecânica da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), o rendimento em biogás pode subir mais (60/90 m³CH₄/ton).

No caso, finalmente, de uma boa coleta seletiva em nível domiciliar, a FORSU pode adquirir potencial ainda maior em biogás (120/180 m³CH₄/ton). Esses dados portanto, comparados com o potencial apresentado na tabela 6, projetam um grande potencial em geração elétrica vindo dos resíduos sólidos urbanos.

Relativamente aos setor agropecuário e da indústria de alimentos existe um grande potencial de produção de biogás. Uma estimativa (ABIOGAS, 2015) destaca a participação

de 40% desse setor no PIB brasileiro e de 37% no consumo energético. Paralelamente esses números estão atrelados a uma participação também nas emissões de carbono, GEE, por volta de 30% do total. A biomassa residual desse setor, conforme a estimativa citada, tem um potencial em produção de biogás por volta de 5 milhões de Nm³/ano, equivalentes a 2,6 bilhões de toe: simulando que todo esse biogás fosse utilizado na geração elétrica via motores CHP acoplados a eletrogeradores, considerando uma composição média de 60% de metano e um fator de rendimento elétrico de 3,7 KWh/Nm³ de metano, temos uma resultante de 12 TWh/ano, equivalente a cerca de 2,5% da Matriz Elétrica Brasileira. Uma estimativa essa que deve naturalmente se confrontar com a natureza distribuída tanto da geração de resíduos como da correspondente geração elétrica. Todavia uma estimativa realística em consideração de quanto alcançado por países europeus que tem apostado nesse caminho sustentável, como Áustria e Alemanha, mesmo tendo agronegócios e indústria alimentícia com tamanhos significativamente menores daqueles brasileiros.

O setor sucroenergético merece uma consideração a parte em vista da produção de resíduos que ainda não são utilizados apropriadamente como a vinhaça, a torta de filtro e a palha. Nas Tabelas 6 e 7 é apresentada a estimativa da Abiogás do potencial em geração elétrica desse setor:

Tabela 6 – Estimativa do potencial de biogás - Fonte Abiogás 2015

Potencial específico de produção de biogás	40 Nm ³ /tc moída
Potencial de geração de energia elétrica	90 kWh/tc
Usina com capacidade de moagem	1 MM tc/safra
Potencial de geração anual	90.000 MWh/ano
Energia Firme	10,27 MW médios

Tabela 7- Estimativa do potencial de biogás – Fonte Abiogás 2015

Moagem safra 2013/2014	650 MM tc
Potencial de geração de energia elétrica	58.500 GWh/ano
Energia Firme	6.678 MW médios
Geração de energia elétrica no Brasil em 2014	570.025 GWh/ano
Potencial de suprimento da demanda de energia elétrica por biogás no Brasil	10%

Podemos ver que se trata de um potencial que, mesmo que realizado só parcialmente devido às citadas questões de distribuição e do tamanho crítico que esses empreendimento precisam alcançar, se torna relevante para os planejadores públicos em função também das externalidades positivas que essa tecnologia acarreta sobre tudo em termos de passivo ambiental evitado no tocante ao tratamento e disposição de resíduos (PLANSAB e PNRS) quanto às emissões evitadas de GEE – Gases de Efeito Estufa.

No caso do setor sucroenergético temos inclusive a indicação de que o que aconteceu na União Europeia em relação ao mercado do biogás, com plantas num tamanho médio bem abaixo de 1 MW elétrico instalado, devido às proporções continentais dos setores produtivos brasileiros, possa aqui ser alterado no sentido de plantas maiores. Uma confirmação disso vem de uma empresa responsável pela construção de uma das primeiras plantas industriais de biodigestão anaeróbia no Brasil, justamente com utilização de resíduos sucro-alcooleiros. A Geoenergética, uma empresa paranaense, tem instalado em colaboração com a Coopercanol em Paranaíba, uma planta com potência instalada de 4 MW elétricos e uma previsão de chegar no curto prazo a 16 MW instalados, com produção também de biometano. Na Figura 17 uma vista da planta e da rede elétrica instalada:



Figura 17 – Usina com rede elétrica geração distribuída - Fonte Geoenergética

Plantas desse tamanho são exceções na Europa, enquanto que aqui no Brasil foram instaladas de forma pioneira num mercado incipiente.

O setor de saneamento básico também merece uma atenção específica pelas implicações sanitárias e econômicas envolvida na aplicação da biodigestão anaeróbia.

Quanto apresentado na Tabela 5 acima pode ser complementado com as observações avançadas na Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano (ABIOGAS, 2015), onde se observa que:

- a maneira atualmente mais viável economicamente é a captação do biogás de aterro
- a PNRS, Lei Federal 12.305/2010, de fato já proíbe o despejo de resíduos orgânicos em aterro sanitário, indicando tratamentos apropriados entre os quais se destaca a biodigestão anaeróbia. Fala-se aqui portanto de cerca de 50% de todo lixo produzido no país, que pode ser submetido a coleta seletiva, separação mecânica ou, no ultimo caso, até tratamento anaeróbio de resíduos indiferenciados para abatimento da carga orgânica poluente e produção de biogás, todas rotas que já têm um estado da arte e muitas aplicações fora do Brasil (REICHERT, G.A. 2005).
- as atividades de abastecimento de água e tratamento de esgoto foram responsáveis em 2009 por 2,6% do consumo de energia elétrica no país, cerca de 10,41 TWh/ano (895 mil tep/ano). Isso correspondeu a 30% do consumo elétrico do setor publico nacional, conforme dados informados pelo Ministério de Minas e Energia em 2011. Isso sem considerar que o PLANSAB prevê um aumento até 92% do esgoto coletado e de 93% do esgoto tratado até 2033, o que aponta para um aumento do consumo elétrico do setor estimável em 100% caso essas metas sejam alcançadas. As poucas experiências de aproveitamento do biogás em estações ETEs aponta para a viabilidade de uma autoprodução energética em volta de 70%. Para o dimensionamento das usinas de biogás nesse setor essa proposta considera tamanhos das ETEs que atendam áreas na faixa entre 100 mil e 200 mil habitantes.

Não apresentamos dados sistematizados sobre esse tópico do potencial metanogênico da biomassa moderna brasileira pela razão que não é o escopo principal desse trabalho, como também por ser esse potencial vinculado a um estudo detalhado das viabilidades de projetos industriais localizados e distribuídos. Todavia, só com esses dados macroscópicos e incompletos, podemos imaginar quanto da poluição ambiental é oriunda da produção e gerenciamento de resíduos orgânicos e quanto dessa poluição pode se tornar energia. Somando a isso a poluição gerada pela queima de combustíveis fósseis, teríamos uma grande parte das cargas poluentes em ação no ecossistema. A estimativa que apresentamos no ponto b do capítulo introdutório desse trabalho, nesse perspectiva, se mostra bastante prudente. Em termos energéticos, usando para o emprego da biodigestão

anaeróbia um coeficiente médio de transformação da matéria orgânica em biometano bem abaixo do possível ($50\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$), o potencial teórico está em volta dos 12,5 trilhões de m^3 de metano por ano. Usando um fator de conversão comum nos motores CHP, de $3,7\text{ KWh}/\text{m}^3\text{CH}_4$, temos um potencial elétrico de mais de 46 TWh, quase 10% da produção elétrica brasileira de 2014. Ou seja, somando o potencial da *biomassa moderna* com a produção hidrelétrica e termelétrica de biomassa tradicional (bagaço de cana, etc.), o Brasil pode realisticamente se ver livre da geração elétrica por combustíveis fósseis no curto/médio prazo. Outra estimativa teórica apresentada pela Abiogás [ABIOGÁS, 2015]), calcula um potencial de 23 bilhões de m^3 de biogás por ano (60% de CH_4), vindo do setor sucroalcooleiro, de alimentos e resíduos urbanos, equivalentes a cerca de 11 milhões de Tep/ano (128 TWh elétricos). Essa estimativa considera o fator de conversão *térmico* do MWh em Tep, que é de 0,86. Considerando todavia que o fator de conversão *elétrico* mediantemente válido em termelétricas brasileiras é de 0,187, essa estimativa sobe para mais de 20 milhões de Tep/ano, considerando o potencial avaliado pela Abiogás, equivalente a 6,54 da Matriz Energética brasileira (MME, 2015). São cálculos que precisam se deparar com a viabilidade, localização e distribuição das usinas, mas é claro que esse duplice potencial, energético e poluente, das biomassas residuais, por si só, sugere uma profunda reflexão sobre as melhores práticas de gerenciamento. Se, de um lado, o potencial poluente dessas componentes biológicas já está em operação no país, em termos de um despejo de milhões de toneladas diárias no meio ambiente (marinho e terrestre, incluindo lixões e aterros), por outro lado o potencial energético é, em grande parte, ainda um algarismo teórico, dependendo de aplicações tecnológicas localizadas que o coloquem em prática. Os números apresentados não deixam muitas dúvidas quanto ao enorme potencial energético distribuído, porém surge uma objeção muito pujante que é a já citada questão de *como* viabilizar isso em termos de projetos industriais localizados e, sobretudo, técnica e financeiramente viáveis. Modelar uma ferramenta que auxilie os estudos de viabilidade e a penetração de plantas de biodigestão anaeróbia no Brasil é o principal objetivo da presente contribuição, por ser essa tecnologia a que mais apresenta grau de maturidade e aplicabilidade no curto e médio prazo, como demonstra a realidade de muitos países desenvolvidos, sobretudo na União Europeia e na China.

3.3 Eficiência comparada da biodigestão anaeróbia

Outras tecnologias que transformam resíduos orgânicos em energia têm essa dupla utilidade (ex. incineração), sendo que nenhuma das alternativas hoje disponíveis para esse tipo de resíduos apresenta as vantagens, a eficiência e as externalidades positivas que a Biodigestão Anaeróbia proporciona:

- a. Ausência de emissões tóxicas ou poluentes, sólidas, líquidas ou gasosas, no processo de produção do biogás.
- b. Produção de um gás nobre, o biometano (CH_4) de elevado potencial energético (50 a 55,5 MJ/kg), a partir do biogás bruto, que tem entre 25 e 38 MJ/kg.
- c. Compatibilidade do biogás/biometano com os motores a combustão interna e CHP (Combined Heat & Power) e equiparação do biometano com o gás natural (Resolução ANP n. 8 de 2015).
- d. Composto resultante do processo de biodigestão anaeróbia com características de adubo ou fertilizante orgânico em substituição dos fertilizantes químicos de origem fóssil (ureia, etc.)
- e. Potencial de implementação da agroecologia e agricultura orgânica através de sistemas de manejo que rodam em volta do Biodigestor Anaeróbio.
- f. Duplo potencial nas medidas para redução do aquecimento global: *mitigação* das emissões de GEE, gases de efeito estufa e *sequestro* de carbono via aumento da PPL – Produção Primária Líquida e consequente contribuição para estocagem de carbono da atmosfera no solo (BECCS – Bioenergy Carbon Capture and Storage)¹¹.

Todos os *plus* competitivos que essa tecnologia apresenta já podem ser averiguados e medidos nas inúmeras aplicações existentes na Europa, onde em vários casos têm um papel de certa relevância nas matrizes energéticas, sobre tudo elétricas, além de apresentar fortes externalidades positivas. Uma comparação entre as melhores tecnologias para emprego energético de biomassas tem sido realizada em uma tese de doutorado (PRETO. R., 2010), numa avaliação entre os processos de aproveitamento energético termoquímicos, biológicos

¹¹ A capacidade de sequestrar carbono da atmosfera, além de mitigar as emissões de GEE, é peculiar da biodigestão anaeróbica e está ligado à possibilidade de cultivos dedicados dentro de sistemas adequados de rotação de plantios e uso de terras marginais, inutilizadas ou em fase de desertificação (CIB, 2015). A necessidade, para efetiva inversão do efeito estufa, de sequestrar carbono que já se encontra na atmosfera, foi salientada pelos engenheiros da Google envolvidos no projeto RE<C, abandonado por inviabilidade em 2011.

e químicos. Os dados apresentados confirmam a eficiência do uso do biogás e ambientais.

As tecnologias comparadas nesse estudo são:

- Turbina a vapor alimentada por caldeira a biomassa sólida
- Turbina ORC alimentada por caldeira a biomassa sólida
- Turbina ar quente alimentada por caldeira a biomassa sólida
- Motor Stirling alimentado por caldeira a biomassa sólida
- Turbina a gás alimentada por biomassa gaseificada
- Motor diesel a biogás
- Célula a combustível PEMFC a bioetanol
- Motor a óleo vegetal

Além dos parâmetros energéticos o estudo tem comparado os parâmetros ambientais ligados as emissões gasosas. Na Figura 18 vemos a comparação entre os rendimentos térmicos, elétricos e totais das várias tecnologias de aproveitamento da biomassa, onde o motor a biogás se destaca pelo rendimento elétrico e total. Já na Figura 19, são comparadas as emissões de Óxidos de Nitrogênio e de Dióxido de Carbono evitadas. Finalmente, na Figura 20, é comparado o custo operacional da energia elétrica produzida pela várias tecnologias:

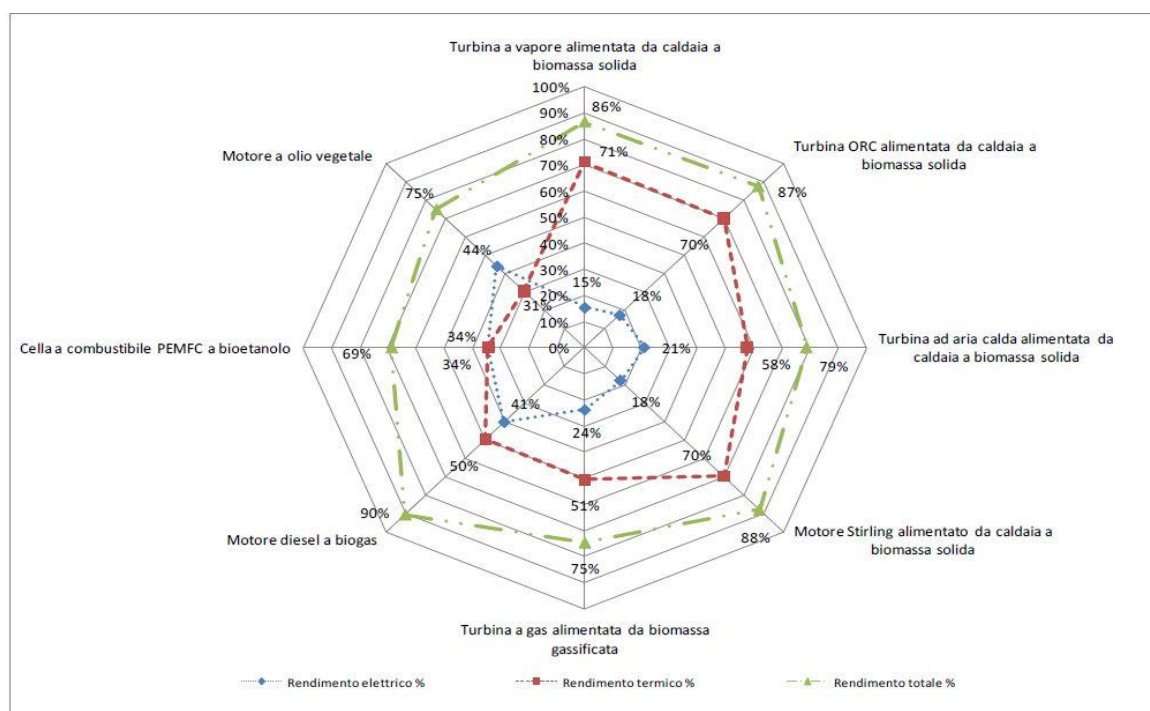


Figura 18 – Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa - Fonte Preto, 2010

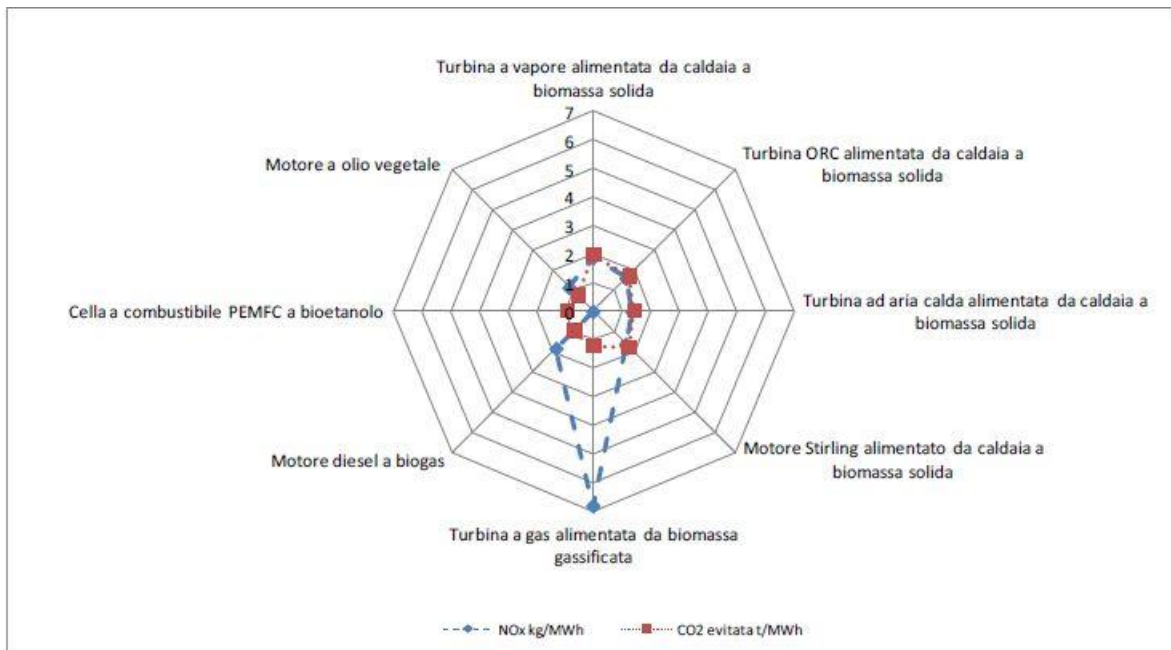


Figura 19 - Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa - Fonte Preto, 2010

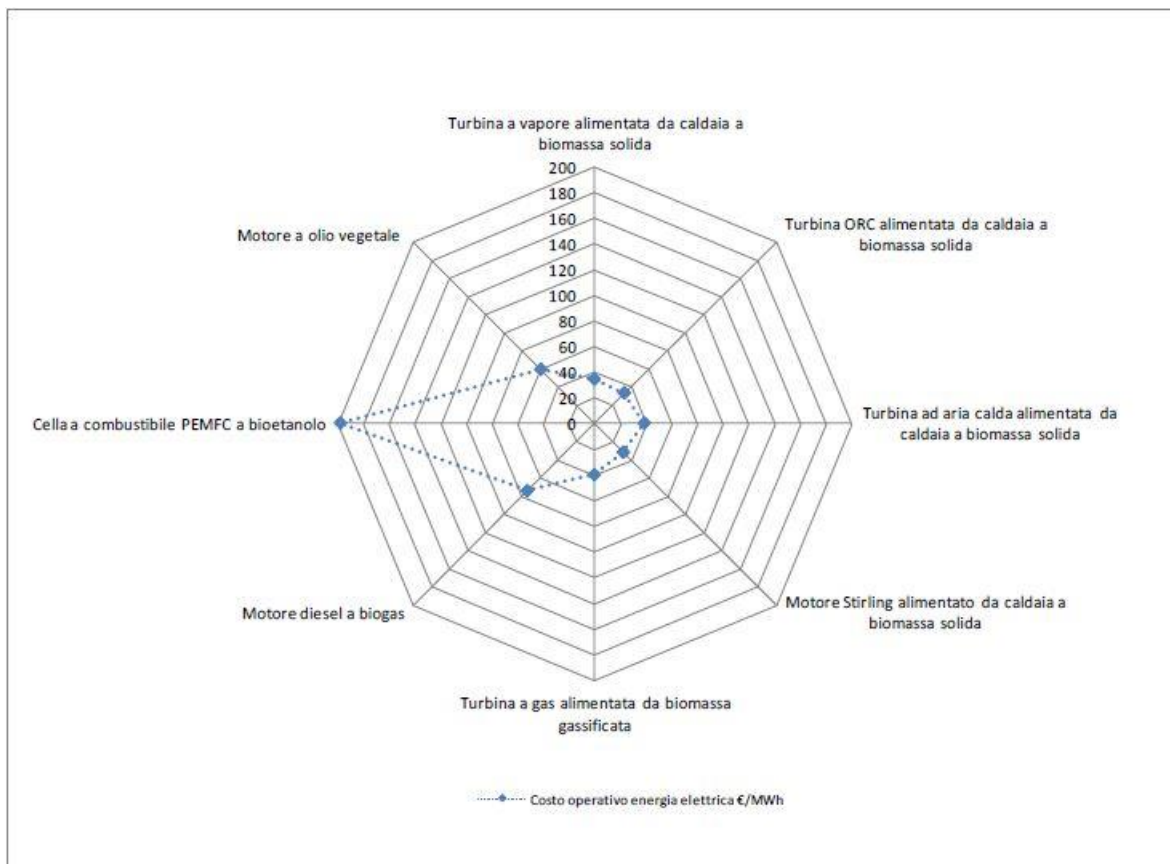


Figura 20 - Comparação entre tecnologias de aproveitamento de biomassa - Fonte Preto, 2010

Deve se destacar que essa comparação, por avaliar conjuntamente biomassa moderna e biomassa tradicional (lignocelulósica), não pode ser considerada uma avaliação definitiva sobre a eficiência da biodigestão anaeróbia em comparação com outras rotas, mas simplesmente da eficiência geral do uso do biogás e da produção elétrica em motores CHP. A avaliação geral deve levar em conta a aplicabilidade e flexibilidade e viabilidade técnico-financeira da biodigestão anaeróbia, conforme as vantagens apresentadas acima nesse capítulo. De uma forma geral, podemos afirmar que no Brasil as melhores aplicações, para fins energéticos, são, para biomassa lignocelulósica, as turbinas a vapor (bagaço de cana) e para biomassa moderna, a biodigestão anaeróbia.

Naturalmente a análise tem que levar em conta as fraquezas e os gargalos que essa rota apresenta, que podem assim ser resumidos:

- a. Um certo grau de complexidade do gerenciamento do bioprocesso responsável pela metanogênese, que requer *expertise* tanto em fase de planejamento da usina e de sua dieta, quanto de gerenciamento da planta. Trata-se de uma tecnologia madura, com *know-how* refinado, mais ainda não implantada e dominada por engenheiros e técnicos brasileiros.
 - b. Dificuldade, para o investidor de justificar o CAPEX em termos de ROI (*Return on Investment*) e TIR (Taxa Interna de Retorno), pois as externalidades positivas que vão em prol da sociedade como um todo, só podem ser contabilizada com sistemas de incentivos públicos, subsídios e desonerações fiscais.
 - c. Necessidade de um nível de escala mínimo para instalação de plantas com biodigestores de alto rendimento, que pode requerer condomínios ou consórcios para viabilizar tecnicamente e financeiramente o negócio.
 - d. Natureza intrinsecamente distribuída das usinas de biodigestão anaeróbia, de pequeno porte, na ordem dos MWe instalados (considera-se o módulo base na ordem de 1 MWe instalado). Com isso cai bastante o interesse dos grandes grupos investidores, perante da dificuldade de agregar grandes volumes econômico-financeiros sob uma única direção.
 - e. Histórico de baixos investimentos da União no setor primário, agrícola e agropecuário, que notoriamente, apesar de sua eficiência e participação no PIB e na balança comercial brasileira, não recebe a devida atenção em termos de investimentos governamentais.
- Comparando pontos fortes e pontos fracos dessa rota tecnológica, fica evidente como ela seja merecedora de incentivos por parte das políticas públicas, como aliás já aconteceu com

o biodiesel e até sem a necessidade de chegar à tamanha intensidade de subsídio. Os exemplos na Europa estão aí para demonstrar que um simples incentivo tarifário no valor para venda do KWh elétrico produzido pode fomentar o surgimento de um número relevante de plantas industriais com relativo impacto na matriz energética. Não é objeto desse artigo se adentrar nesse aspecto até porque já existe uma proposta da Abiogás – Associação Brasileira de Biogás e Biometano, que coloca em detalhes as possibilidades de políticas públicas e de um Plano Nacional para disseminação dessa tecnologia no Brasil (ABIOGAS, 2015).

Onde pretendemos oferecer nossa contribuição aqui é no tocante ao sistema de informações que pode auxiliar engenheiros, empresários e órgãos públicos no estudo de viabilidade de plantas de biodigestão anaeróbia, tanto para a questão técnica quanto para a financeira. Pois, como já salientamos, é primordial para o estudo de viabilidade, para engenharia básica (FEED), para o empresário e para o administrador público, conhecer quanto mais possível em detalhes a localização e as características da biomassa residual disponível no território. Os dados hoje disponíveis são de natureza estatística e bastante esparsos, disseminados dentro de estudos não especificamente voltados para essa questão, como os levantamentos do IBGE, do IPEA e da EPE, entre outros. Por outro lado temos *sites* comerciais, que lidam com o meio rural ou até específicos sobre resíduos¹², por suas naturezas não se propõem de ser abrangentes ou sistemáticos. Temos também estudos que focam no potencial energético dos resíduos em geral, visando outras rotas como incineração e gaseificação. Com isso a tese aporta uma contribuição eclética, fruto de uma experiência acadêmica casada com uma experiência de campo no setor privado empresarial, às voltas com as dificuldades para fechar estudos de viabilidade para usinas de biodigestão anaeróbia por conta da ausência de informações sobre a localização, natureza e concentração de resíduos sujeitos a esse tipo de tratamento. As dificuldades aqui encontradas foram também de caráter acadêmico, devido à falta de estudos específicos sobre o tema, um fato ligado ao estado incipiente dessa tecnologia no país. Uma

¹² A plataforma comercial B2Blue, disponível em <http://b2blue.net/conteúdo/institucional/> é interessante em relação ao potencial de negócio ínsito nos resíduos orgânicos, apesar de não ser especificamente voltada para aproveitamento energético. Foi levada em conta na modelagem desta Base de Dados que, apesar de não ter finalidades estritamente comerciais, deve considerar a disponibilidade dos usuários em fornecer dados relativos à produção de seus resíduos. Sites ligados ao agronegócio, como o da MF Rural, de alguma maneira tangem essa questão, sem abordá-la diretamente.

contribuição relevante também será relevada no parágrafo 5.2 relativo à tipificação de resíduos, já que só existem dados esparsos sobre as categorias residuais orgânicas que de fato podem ser submetidas a tratamento por biodigestão anaeróbia.

Veremos no próximo capítulo, inerente o contexto regulatório, como o PNRS – Plano Nacional de Resíduos Sólidos, ao instituir o SINIR – Sistema Nacional sobre Gestão dos Resíduos Sólidos, não apresente ainda um sistema informático de coleta sistematizada e centralizada de dados, apesar de estar esse sistema, pelo que se entende, intimamente ligado à própria concepção do SINIR. Naturalmente esse fato pode estar ligado a uma real complexidade da tarefa e dos atores envolvidos, no que diz respeito tanto à tipificação dos resíduos em função de suas origens, quanto ao modelo real de Base de Dados e, sobre tudo, às dificuldades em viabilizar a coleta de dados confiáveis. As fontes de informação, também são bastante heterogêneas, dificultando a tarefa. Nos limitamos portanto, nesse trabalho, em apresentar um modelo de Banco de Dados apto para acolher informações relevantes e sistematizadas sobre a localização, a natureza e quantidade de resíduos orgânicos de interesse da biodigestão anaeróbia.

O processo da biodigestão anaeróbia de substratos residuais orgânicos é de fato milenar, tendo registro dessas atividades já na Índia e na China antigas. A produção de um biogás de elevado poder calorífico, sendo composto em sua maior parte de gás metano (CH_4) já atraía as populações antigas em suas moradias. Vale lembrar aqui o valor energético do biogás bruto em relação a outros combustíveis, conforme ilustrado na Figura 21:

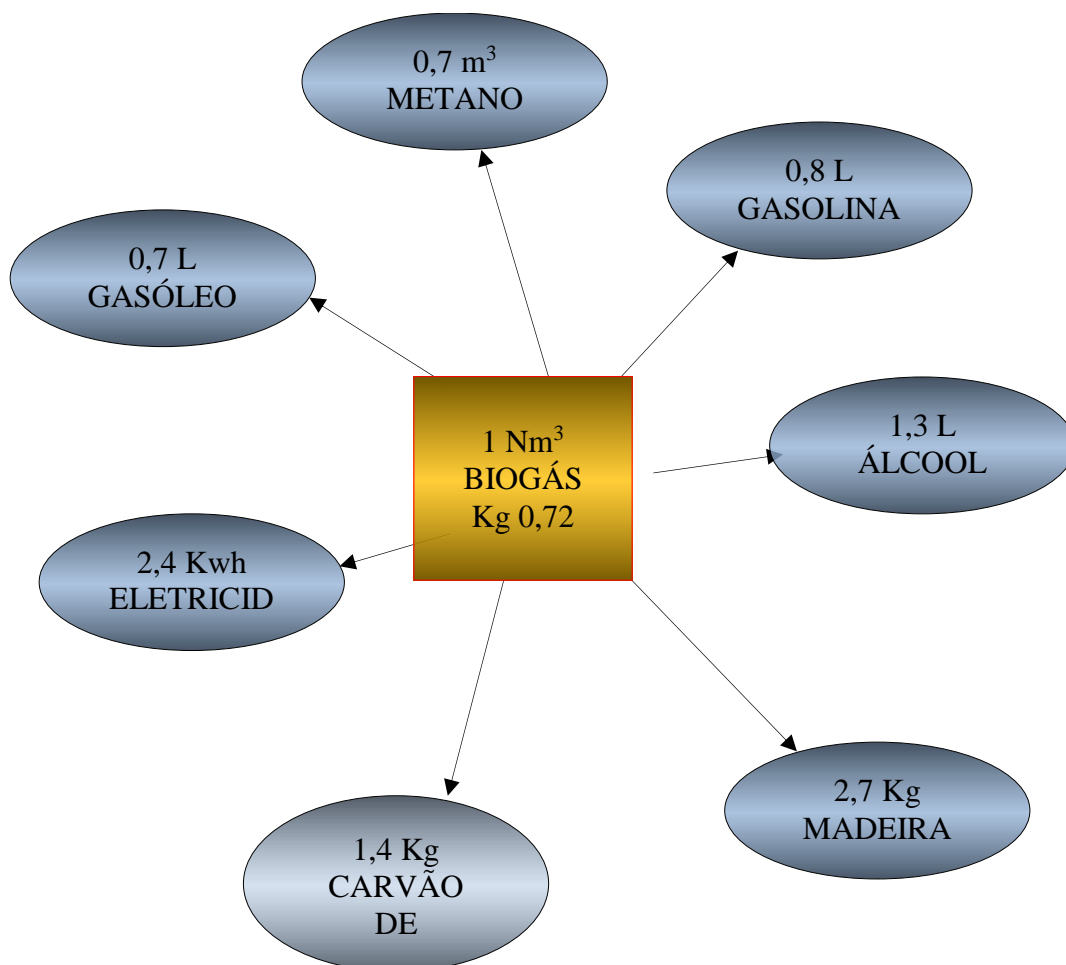


Figura 21 – Comparação entre biogás e outros combustíveis - Fonte elaboração própria

3.4 Difusão da biodigestão anaeróbia em países desenvolvidos

Apesar disso podemos dizer que nos países desenvolvidos, se consideramos seu uso a nível industrial com produções de uma certa relevância, somente a partir dos anos '70 do século passado começamos a ter registro deste segmento mercadológico. Ao longo dos últimos 40 anos, porém, a produção de biogás na Europa tem alcançado números relevantes, formando um nicho de produção sobre tudo na matriz elétrica de países como Alemanha, Itália, França e Inglaterra, entre outros. O Gráfico 5 apresenta o numero de plantas de biogás e a potência elétrica instalada na Europa, computando um total de 17.240 usinas em operação até Dezembro de 2014, por uma capacidade instalada total de 8.293 MWe:

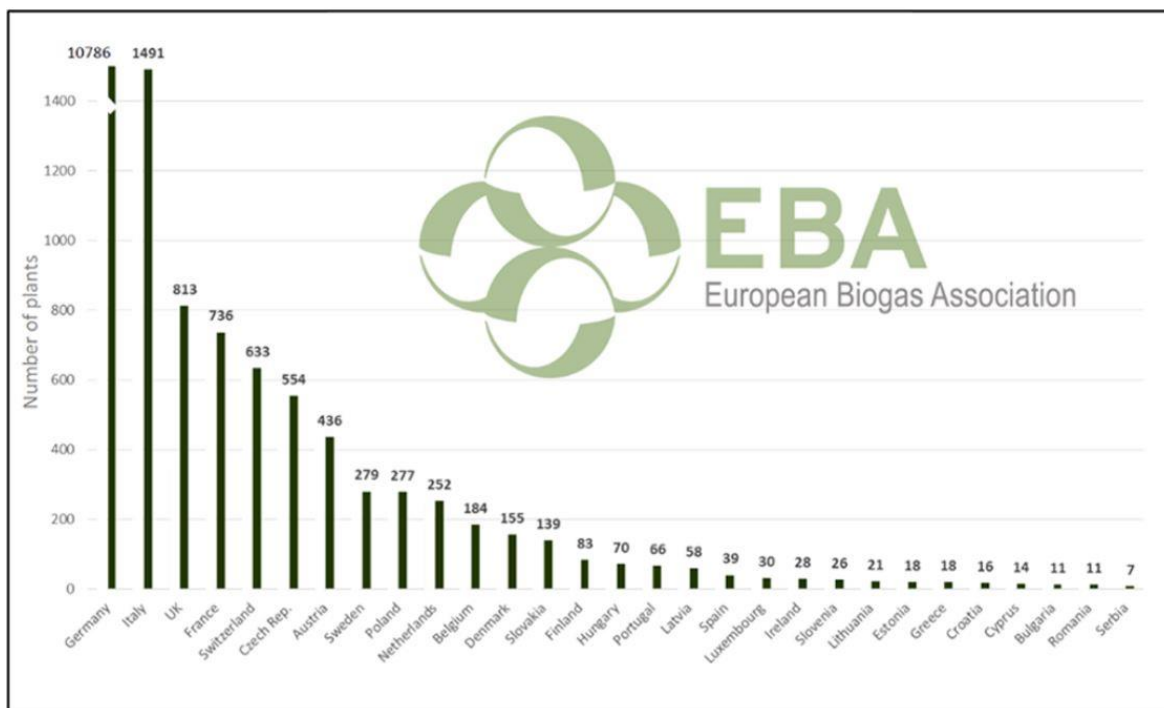


Gráfico 5 – Capacidade elétrica instalada com biogás na Europa - Fonte EBA 2015

Já o Gráfico 6 mostra a evolução do setor no período 2010-2014, em termos de número de plantas e capacidade elétrica instalada:

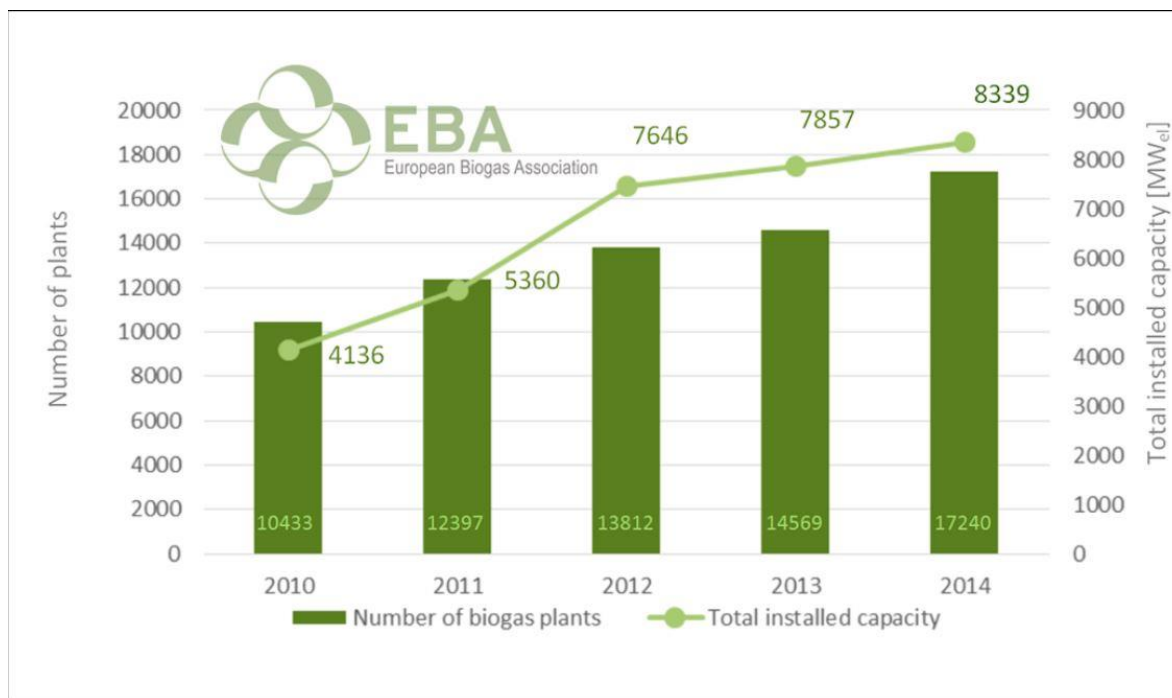


Gráfico 6 – Evolução do biogás na Europa 2010-2014 - Fonte EBA, 2015

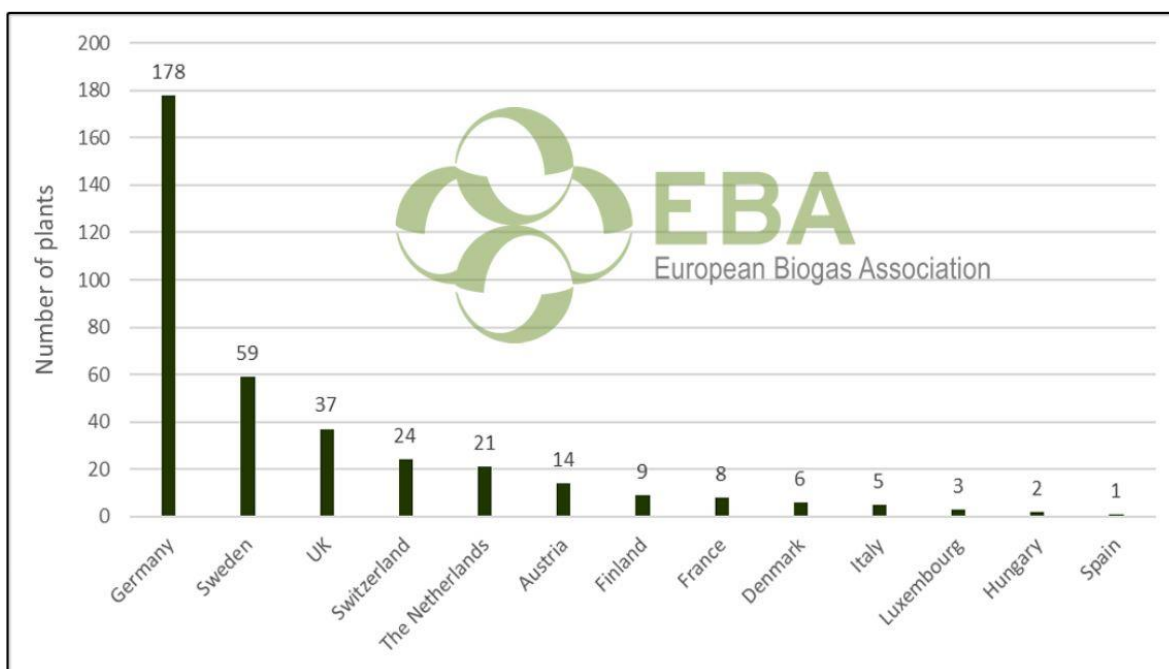


Gráfico 7 – Difusão de *biogas upgrading* na Europa - Fonte EBA, 2015

Finalmente, o Gráfico 7 apresenta o grau de difusão das plantas de enriquecimento do biogás para biometano, computando 367 usinas de biodigestão anaeróbia integradas com planta de enriquecimento, por uma capacidade total de enriquecimento de 310 mil m³/hora de biogás bruto:

Relacionando esses números à realidade brasileira, no seu tamanho continental, entendemos quanto seja realístico o potencial apresentado pela Abiogás (ABIOGAS, 2015), que já citamos no presente capítulo. A capacidade instalada na Europa, de 8293 MWe, corresponde a um consumo estimável entre 36 e 37 bilhões de m³ biogás por ano. Vemos com isso que os 23 bilhões de m³ de biogás por ano podem até ser uma subestima, em consideração do tamanho do agronegócio, da agropecuária, da indústria alimentícia e da geração de resíduos sólidos urbanos e esgoto no Brasil. Já a estimativa apresentada pelo autor desse trabalho na introdução, que aponta para um potencial de 700 MWe instalados nos próximos 10/15 anos, é extremamente prudencial, até porque considera só uma parte do mercado potencial, não computando o potencial do biogás de aterro, do lixo urbano e das ETEs. Muito depende das escolhas dos governos nos planos nacionais de gerenciamento de resíduos e energéticos, com suas consequentes medidas de incentivação e desoneração fiscal. Já nos países da América do Norte, querendo considerar só países desenvolvidos,

essa tecnologia não tem ainda encontrado um espaço tão relevante quanto na Europa: o motivo disso não é a disponibilidade de substratos orgânicos aptos, mas sim de ordem cultural e econômica, primeiramente, o que se reflete nas escolhas dos governos em relação a quais políticas de geração de energia elétrica e de saneamento ambiental apoiar e incentivar, em termos de legislação, subsídios, incentivação e vínculos. Vemos portanto nos E.U.A e no Canadá a situação da tabela 2 abaixo, em contraste com uma disponibilidade de resíduos orgânicos que compõe um potencial bem maior: A realidade dos EUA demonstra claramente esse fato, apresentando ainda uma difusão dessas usinas bem abaixo do potencial e do tamanho desse país. De acordo com os levantamentos do ABC, American Biogas Council (ABC,2016) A Figura 22 ilustra essa situação:

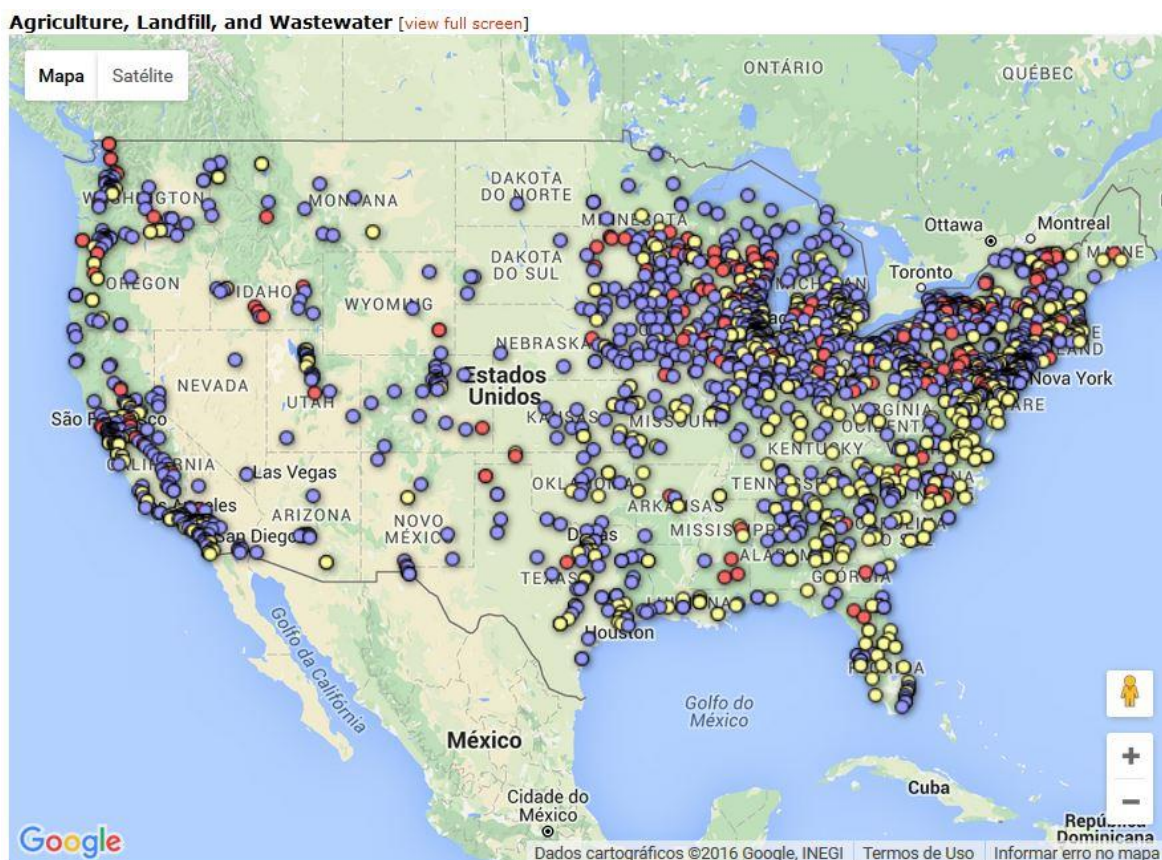


Figura 22, Usinas de biogás nos EUA - fonte ABC, 2016

Esse mapa, acessível no site da ABC citado na bibliografia, apresenta a seguinte situação:

- 2.100 Plantas instaladas em 50 estados da União
- 247 biodigestores anaeróbios instalados em fazendas e propriedades agrícolas
- 1.241 plantas ETEs e ETRAs utilizando-se de biodigestores anaeróbios, sendo que cerca de 860 aproveitam o biogás produzido em seu funcionamento.
- 54 sistemas de biodigestão anaeróbia aproveitando restos de comida
- 645 projetos de biogás de aterro sanitário

Conforme apontado por esse órgão o potencial para os EUA, assim como para o Brasil, é muito grande. A estimativa desse potencial é a seguinte (ABC, 2016):

- 11.000 sítios prontos para essa aplicação
- 8.241 empresas pecuárias (bovinos e suínos)
- 2.440 plantas ETEs e ETRAs
- 440 projetos de biogás de aterro sanitário
- 33 bilhões de U\$ no mercado potencial para construção das plantas
- 275 mil postos de trabalho de curto prazo
- 18 mil postos de trabalho permanente

Perante deste cenário, chegamos à situação brasileira, aonde a tecnologia da biodigestão anaeróbia também chegou na década de '70, mas de fato só a partir de anos muito recentes, após 2010, tem dado sinal de poder compor um mercado de alguma relevância em termos de produção elétrica e saneamento ambiental.

3.5 Difusão da biodigestão anaeróbia no Brasil

Os números europeus e as estimativas norte-americanas são uma boa referência para a estimativa do potencial brasileiro, haja vista que ainda não temos no país levantamentos tão detalhados, até porque o mercado é ainda incipiente. Um estudo do CIBiogas (MARIANI, 2015) apresenta a situação das Figura 23 e 24 relativamente a rota de pesquisa 1, com base internet e contatos pessoais:

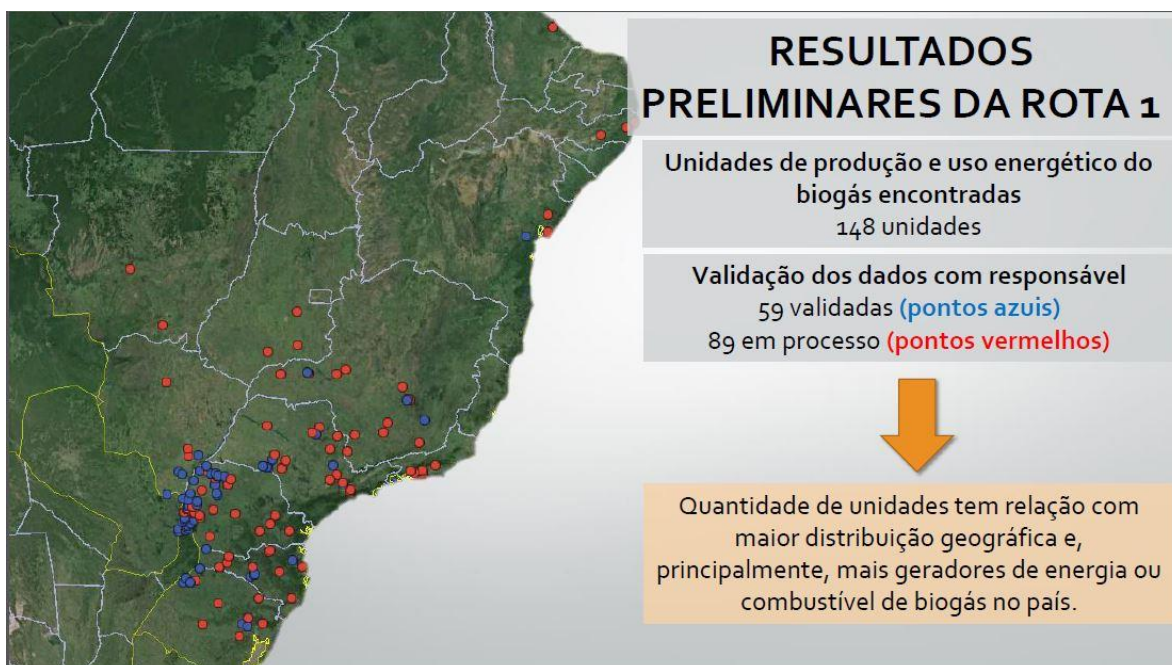


Figura 23 – Difusão do biogás no Brasil - Fonte CIBiogas- Mariani, 2015.

Categoria da unidade	Quantidade de unidades		Produção média de biogás atual ou esperada (Nm ³ /dia)	
	Total*	Validadas*	Todas*	Validadas*
Agropecuária	61	17	24.660	19.860
Aterros Sanitários	17	5	1.209.980	176.500
Indústria	58	32	401.246	331.210
Lodo de esgoto	4	1	20.480	50
Resíduos orgânicos	8	4	124.750	123.000
Total Geral	148	59	1.781.116	650.620

*Dados em preliminares e referentes a unidades em planejamento/instalação, em operação e em reforma.

Se 1 m³ de biogás = 0,61 litros de gasolina

Litros de gasolina/dia	1.086.481	396.878
Tanques de carro popular/dia	21.304	7.782

Figura 24 – Produção de biogás no Brasil - Fonte CIBiogas- Mariani, 2015.

Relativamente ao possível mercado de curto prazo é interessante também a Tabela 8, que resume os projetos MDL em curso, todas situações potencialmente sujeitas, por sua natureza, a implantação de sistemas de biodigestão anaeróbia. Um exemplo é o Programa 3S de suinocultura sustentável da Sadia, creditado no sistema MDL em 2006, que ainda emprega sistemas incompletos de biodigestão anaeróbia, com subutilização do biogás produzido nas granjas (SADIA/USP, 2006).

Tabela 8 – Projetos MDL em curso no Brasil - Fonte Moraes Fallero, 2014

Projetos de MDL registrados na UNFCCC durante o primeiro período do Protocolo de Quioto	Brasil	Mundo
Total de projetos	299	7.147
Total de projetos de energia renovável	185	6.026
Porcentagem de projetos de energia renovável	61%	84%
Projeto de energia renovável de acordo com a metodologia ACM 0002	98	3.104
Porcentagem projetos de acordo com a metodologia ACM 0002	53%	51%

Frente esses dados há fortes indícios de que um novo mercado está se formando no Brasil, onde, como na maioria dos países do mundo, a disponibilidade de substratos residuais orgânicos, sejam eles de resíduos sólidos urbanos, industriais ou subprodutos orgânicos, é abundante e constituem também um problema de disposição, de controle de poluição e de saneamento ambiental. Escopo deste trabalho é avaliar, dentro da situação acima delineada, a atual viabilidade deste tipo de plantas industriais, considerando todos os aspectos relevantes: marcos regulatórios e legislação em matéria, subsídios e empecilhos; disponibilidade de substratos e aspectos mercadológicos; aspectos tecnológicos e disponibilidade de fornecedores de peças, equipamentos e serviços: tudo a compor, finalmente, um quadro de viabilidade econômico-financeira, ou menos, e consequentemente tentar um prognóstico do desenvolvimento deste mercado nos próximos anos, com seu possível impacto na Matriz Elétrica Brasileira.

4. OUTRAS ROTAS E TECNOLOGIAS PARA BIOMASSA

A biodigestão anaeróbia não é a única forma de retirar energia de biomassa residual ou dedicada. Apesar dessa Base de Dados estar dedicada a essa tecnologia, outras rotas existem que podem ser aplicadas à biomassa e se beneficiar dessas informações, assim como aqui organizadas ou com os devidos ajustes. Consideramos nesse capítulo os outros destinos que podem ser dados às biomassas residuais, para fins energéticos e em alternativa à disposição em lixões. Somente a compostagem não será aqui considerada, devido ao fato que essa rota, apesar de ser uma alternativa interessante para inertizar e estabilizar a carga orgânica dos resíduos de biomassa tradicional e moderna, não comporta um adequado aproveitamento do potencial energético neles contido. Todavia a compostagem simples de resíduos orgânicos pode ser considerada uma válida alternativa à disposição de resíduos orgânicos em lixões e aterros sanitários, quando não haja viabilidade técnico-econômica para rotas mais eficientes. Em relação a biomassa moderna, a biodigestão anaeróbia, de uma forma geral, pode ser considerada, juntamente com as opções das biorrefinarias, a rota mais eficiente para transformação de resíduos orgânicos, principalmente pelo fato que a elevada porcentagem de água contida nela não a indica eletivamente para rotas termoquímicas. Já a biomassa tradicional é mais indicada para rotas termoquímicas e, em alternativas, biorrefinarias. Como veremos no próximo capítulo as frações lignocelulósicas contidas na biomassa residual são de difícil acesso para as bactérias envolvidas na produção de biogás. Os projetistas, ao considerar o destino dos montantes de biomassa residual disponíveis, precisam ter em mente todas as tecnologias, em função das características da biomassa residual (ex. porcentagem de componentes lignocelulósicas, água, etc)¹³ e de outros fatores de natureza logística e técnico-financeira (fatores de escala, transporte, custos dos equipamentos, etc.). Já a tendência do mercado é em simplificar as propostas, promovendo soluções em certo grau padronizadas, sendo porém um cenário mais desejável o surgimento de empresas integradoras (engineerings) com condição de avaliar, no estudo de viabilidade, a melhor opção de projeto e, possivelmente, a integração de rotas complementares (ex. Biodigestão anaeróbia, compostagem e biorrefinarias).

¹³ No que diz respeito às biorrefinarias, outros parâmetros de caracterização, mais variados e sofisticados, deverão ser levados em conta, haja vista a grande variedade de produtos e processos de transformação que esse universo proporciona (CGEE, 2010).

Para os fins desse trabalho é importante apresentar resumidamente as tecnologias mais empregadas para biomassa com prevalência lignocelulósica, justamente por essas componentes serem refratárias à ação das bactérias metanogênicas. Além disso, muito frequentemente os montantes de biomassa residual apresentam uma mistura de componentes voláteis com frações lignocelulósicas de lenta degradação, sugerindo uma integração das diferentes tecnologias para usinas de tratamento ¹⁴.

De forma geral pode-se colocar como objetivo destinar os resíduos orgânicos para o tratamento mais adequado de forma localizada (distribuída) com projetos de pequeno e médio porte, para evitar o que até nos países mais desenvolvidos muitas vezes é adotado, como no caso de incineradores de grande porte, onde grandes montantes de resíduos orgânicos, com forte componente húmida, entram em rotas de transformação termoquímica. Apresentamos a seguir as diferentes rotas de forma geral e, sobretudo, em suas aplicações à biomassa residual, tanto moderna como tradicional.

4.1 Combustão ou Queima direta

A combustão ou queima é uma reação química exotérmica de oxidação completa entre uma substância (combustível) e um gás (comburente) que normalmente é o oxigênio contido no ar. Durante essa reação a energia química contida no combustível é liberada em forma de calor e luz. Dependendo da composição do combustível, do sistema de combustão e das características de funcionamento da planta, a combustão de biomassa pode ter diferentes emissões de CO, hidrocarbonetos (CH), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), alcatrão, fuligem e materiais particulados (cinzas), além de óxidos de nitrogênio (NO_x), óxido nítrico (N₂O), cloreto de hidrogênio (HCl), dióxido de enxofre (SO₂), sais, dioxinas e metais pesados e metais pesados. A combustão de biomassa se aplica nos três estados, sólido, líquido e gasoso. Em relação aos combustíveis fósseis, as biomassas têm a peculiaridade de não serem inflamáveis em condições ambiente. Os requisitos técnicos para que possa ocorrer uma combustão completa são resumidos a seguir:

¹⁴ Pesquisa está sendo desenvolvida para as fases de pré-tratamento e hidrólise dos substratos em entrada no processo de biodigestão anaeróbia, para que as ligações moleculares complexas de carboidratos, proteínas e gorduras (polímeros) sejam quebradas em compostos orgânicos simples (monômeros) por via físico-química e/ou enzimática, facilitando com isso o metabolismo metanogênico. Todavia os custos envolvidos e o estado da arte ainda tornam as frações lignocelulósicas ainda pouco indicadas para as dietas de biodigestores anaeróbios de alto rendimento (CREMONEZ, P.A. ET AL. 2013)

- O ar oxidante deve ser fornecido em quantidades superiores à estequiométrica, ou seja em uma relação molar superior àquela que viabiliza o começo da reação química.
- O gás que se produz durante a combustão deve se misturar de forma correta com o ar comburente.
- O gás combustível gerado durante o processo de combustão deve residir na área de reação durante um tempo de espera suficiente.
- A temperatura durante o inteiro processo se mantenha suficientemente alta.

As tecnologias mais usadas para combustão de biomassa sólida são as caldeiras e estufas, que são projetadas para respeitar as condições listadas acima.

Ao falarmos hoje de aproveitamento energético de biomassa, tanto a nível mundial como brasileiro, estamos de fato apontando principalmente para rotas termoquímicas envolvendo combustão ou queima direta de substratos lignocelulósicos. De fato só as usinas de incineração, ao queimar resíduos urbanos e industriais em escalas de média para grande, estão aplicando a combustão à biomassa moderna, que, dependendo do grau de desenvolvimento do país considerado, pode conter de 20% até 60%, em alguns casos até mais, de componente orgânica, com elevado teor de água.(referência incineração). Os incineradores de RSU – Resíduos Sólidos Urbano e resíduos industriais, incluindo as porcentagens variáveis de biomassa moderna citadas acima, tem uma participação relevante em vários países industrializados, como na Itália, onde temos o termo utilizador de Brescia, um dos maiores da Europa, com capacidade para queimar cerca de 750 mil toneladas de resíduos urbanos e biomassa por ano, produzindo mais de 800 milhões de KWh térmicos ao ano. Há bastantes controvérsias em relação a essa aplicação no gerenciamento dos resíduos sólidos. O que se pode afirmar com certeza é que se trata de escolhas técnicas e socioeconômicas ligadas a uma visão centralizada de gestão, em muitos casos inevitável, sobretudo em grandes centros urbanos com disponibilidade de espaço limitada. A analogia, translada no domínio da geração elétrica, é com as hidrelétricas de grande porte, com produção centralizada de grandes quantidades de energia. Uma demonstração dessas controvérsias é o fato, por exemplo, que o citado termo utilizador de Brescia, de um lado, tem recebido o Industry Award 2006 do Wtert da Columbia University em New York; por outro lado a vários estudos, como o elaborado pela

Greenpeace, relatando os efeitos nocivos dessas usinas para saúde humana e relativizando a real eficiência dessa rota em termos de balanço de massa ao considerar resíduos em entrada e saída, incluindo resíduos gasosos (ALLSLOP, COSTNER, JOHNSTON, 2001).

No Brasil a tecnologia de incineração de resíduos sólidos, incluindo a parcela orgânica e biomassa moderna, assim como todas as tecnologias de gestão e gerenciamento de resíduos, está engatinhando. Um levantamento da ABLP –Associação Brasileira de Limpeza Pública, listava cerca de uma dúzia de unidades relevantes em operação em 2000 (AMARAL MENEZES, GERLACH, MENEZES, 2000). As dúvidas específicas que podem ser levantadas em relação à aplicação da incineração de resíduos sólidos no Brasil tem a ver principalmente com a disponibilidade de terras disponíveis no Brasil, inclusive nos cinturões urbanos em volta das grandes cidades: justamente a falta de espaço e terrenos disponíveis para estruturas de disposição (aterros sanitários) e tratamento (usinas) tem motivado esta opção na Europa. Relativamente aos outros questionamentos vale o debate geral, apontando principalmente para oportunidade de soluções distribuídas e para os custos ligados a um controle efetivo dos impactos ambientais dessas usinas (sistemas de filtragem de gases, gerenciamento de cinzas, etc.).

Já a combustão de biomassa tradicional, basicamente lignocelulósica, é amplamente usada no mundo inteiro desde épocas anteriores à revolução industrial para geração de energia térmica distribuída, a nível mundial, tendo impacto relevante na geração elétrica, fato esse ligado à força do setor sucro-alcooleiro que se destaca no Brasil.

A Figura 25 apresenta um impacto de quase 8% na oferta interna de energia elétrica vindo de biomassa, o que inclui lenha, bagaço de cana, licor negro e outras recuperações.

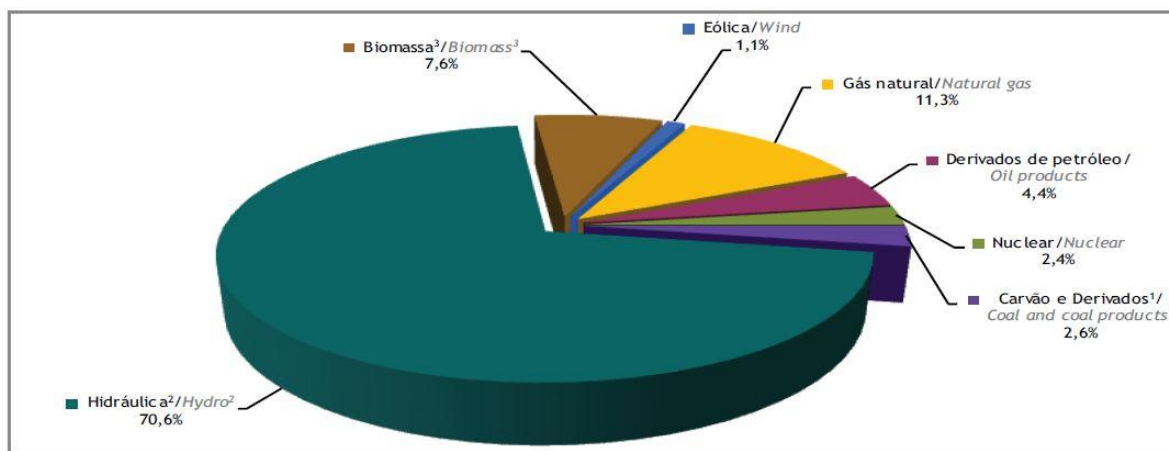


Figura 25 – Incidência da biomassa na matriz elétrica brasileira - Fonte BEN 2014

É importante salientar que nesse dados ainda é praticamente irrelevante a contribuição da biomassa moderna na geração elétrica, apesar de existirem as já citadas usinas de incineração de biomassa moderna e, sobretudo, algumas plantas de biodigestão anaeróbia de alto rendimento ainda pioneiras, apontando para futura contribuição dessa fonte na matriz elétrica, nos moldes do que já está acontecendo na maioria dos países europeus.

O estado da arte da combustão de biomassa tradicional no Brasil, se excluirmos os montantes energéticos produzidos em micro-escala distribuída no território pela queima de lenha e outros resíduos agrícolas e agrossilvopastoris em caldeiras e fornos em nível familiar, que são difíceis de serem computados, é bastante claro, em relação aos sistemas usados (FIORI CARDOSO, T., 2011):

- Sistemas de Turbinas Retrofit, que são tentativas de adequar a eficiência de transformação de motores projetados antes da década de '90, quando ainda não havia a possibilidade de injetar energia excedente na rede elétrica.
- Caldeiras que produzem vapor para máquinas térmicas que disponibilizam o calor para diferentes processos na indústria sucro-alcooleira, alimentícia, etc.
- Turbinas a vapor de vários tipos (condensação, contrapressão, extração e condensação mista), que podem ou não ser combinadas com outros tipos de turbinas (hidráulicas, a gás, eólicas). Dependendo das necessidades das aplicações as turbinas de cogeração podem privilegiar a geração térmica, mecânica ou elétrica.

Várias opções podem ser combinadas, em relação às diferentes eficiências e natureza da energia produzida, em função de cada projeto (RODRIGUES, L.G.S., 2005).

Em relação ao presente trabalho cabe notar que quando há montantes relevantes de biomassa lignocelulósica concomitantemente à disponibilidade de biomassa moderna, em mistura ou separadamente, deverão ser avaliadas em cada projeto diferentes opções de separação, pre-tratamento e hidrólise, em caso de aplicação da biodigestão anaeróbia e possibilidades técnico-financeiras que integrem no projeto soluções de queima da parcela rica em lignina e biometanização das componentes orgânicas mais voláteis, de forma complementar. No caso específico e muito relevante do setor sucroalcooleiro a questão do destino do vinhoto deverá ser levada em conta, já que o vinhoto, apesar de ser uma

biomassa com forte contaminação química, pode ser utilizado para produção de biogás (PLAZA PINTO, C.,1999)

4.2 Pirólise

Já ao abordar a tecnologia da pirólise e, nos próximos parágrafos desse capítulo, a da gaseificação e das biorrefinarias, entramos em um domínio que, apesar de promissor, é de fato pioneiro tanto no Brasil como nos países desenvolvidos, de forma que os impactos nas matrizes energéticas, tanto primária quanto elétrica, são ainda pouco relevantes. Nos delongaremos sobre a pirólise além do que seria esperado num trabalho cujo foco é a ordenação de resíduos orgânicos e biomassas em função da produção de biogás, por dois motivos fundamentais, que determinam certa complementariedade entre essas duas tecnologias:

a) a pirólise, também chamada de pirogaseificação ou gaseificação pirolítica, como veremos, é uma tecnologia particularmente indicada para aproveitamento ou reaproveitamento de madeira e outros substratos lignocelulósicos, ao mesmo tempo em que a biodigestão anaeróbia encontra ainda materiais recalcitrantes nessa tipologia de substratos.

b) O syngas, produto gasoso do processo de pirólise, tem entre suas componentes de gases combustíveis, além do hidrogênio (H_2), metano (CH_4) e gases não combustíveis como o dióxido de carbono (CO_2), analogamente à biodigestão anaeróbia, apesar de haver no caso do syngas uma maior complexidade e variabilidade na composição do gás de síntese, em função também do tipo de substrato processado¹⁵. Com isso tanto o syngas quanto o biogás podem ser usados, feitos os devidos ajustes e adaptações, em motores similares, oriundos do ciclo diesel ou ciclo Otto, do tipo *Combined Heat and Power* de combustão interna (CHP).

Descrição da tecnologia

¹⁵ No caso do biogás o principal parâmetro de variabilidade diz respeito às porcentagens de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo componentes principais de menor impacto quantitativo o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o nitrogênio (N). Já no caso do syngas pode haver proporções muito variáveis, em função do substrato processado de gases combustíveis como hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), além de gases não combustíveis como vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e Nitrogênio (N), compostos de sódio e potássio, compostos de cadeias carbônicas longas como o alcatrão, amônia (NH_3) e compostos sulfurados como o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Essa diferença torna mais complexa a calibração dos motores CHP que queimam syngas, devido também à relevante presença de hidrogênio livre (FRANCESCATO, V., 2013).

A pirólise tem sido praticada historicamente durante séculos para produção de carvão vegetal. O exemplo das carvoarias artesanais, aqui no Brasil, é um bom exemplo dessas técnicas de carbonização, recentemente submetidas à análise comparativa sistemática (CGEE, 2014). Dessa forma a aplicação tem requerido tempos relativamente lentos e temperaturas e temperaturas muito baixas para se obter o produto sólido, conforme aplicação artesanal representada na Figura 26. Já aplicações tecnológicas mais recentes e estudos científicos sobre os mecanismos da pirólise, tem sugerido várias maneiras de mudar e controlar substancialmente as proporções de produtos gasosos, líquidos e sólidos, por via principalmente da alteração da temperatura e do tempo de residência, mas também de outros fatores como a pressão na câmara de processo e as variações, sempre próximas ao zero, de agentes oxidantes.



Figura 26 – Pirólise artesanal de biomassa - Fonte Reporter Brasil, 2008.

Definimos a pirolise, em suas versões tecnológicas mais avançadas, como um processo de degradação termoquímica que ocorre com a aplicação de calor a uma substância, em completa ausência de agente oxidante (ar, oxigênio, etc.) ou com suprimento

extremamente limitado de agente oxidante (gaseificação parcial). Trata-se de um processo endotérmico que precisa da aplicação externa de uma fonte de energia (calor) para seu desenvolvimento (LORA, E.S., VENTURINI, E.J., 2012). Temperaturas relativamente baixas são empregadas, entre 400 e 800 graus °C, quando comparadas com as temperaturas da gaseificação, que veremos no próximo parágrafo, entre 800 e 1000 °C. Este processo produz, em proporções variáveis que dependem de vários fatores que definem o método pirolítico empregado, três produtos principais:

- gás de síntese (syngas), uma fração gasosa de baixo/médio poder calorífico composta principalmente por CO, CO₂, hidrocarbonetos (CH₄, C₂H₆, C₃H₆), H₂O e H₂.
- óleo pirolítico, uma fração líquida oleosas contendo alcatrão, água e compostos orgânicos de baixo peso molecular como aldeídos, ácidos, cetonas e álcoois.
- carvão, um produto sólido constituído por resíduos de maior peso molecular como fuligens, cinzas, inertes e metais. No caso de uso de uma biomassa de origem vegetal, trata-se de um carvão vegetal (biochar)¹⁶.

Além da temperatura outros fatores influenciam as características dos produtos desse processo requerendo dos projetistas uma calibração atenta de cada planta em função da biomassa de alimentação:

- Velocidade de aquecimento da biomassa (*Fast, Slow*)
- Tempo de residência no interior do reator
- Dimensões e forma física da biomassa utilizada (briquetes, lascas)
- Eventual presença de catalizadores (ácidos de Lewis, tetracloro-aluminatos de metais fundidos, etc.) (ALMEIDA, D. MARQUES, M.F., 2016).

Podemos definir quatro modalidades de pirólise (DELL'ANTONIA, D., 2012):

- Pirólise lenta, processo caracterizado por temperaturas de reação muito baixas, entre 300 °C e 500 °C, baixa velocidade de aquecimento da biomassa, longos tempos de residência em ausência de oxigênio e elevada produção de carvão (35% da biomassa em entrada). As carvoarias, tanto industriais como as artesanais da figura 30, são um exemplo dessa aplicação.

¹⁶ Essa notação torna-se necessária em quanto que, como veremos no parágrafo dedicado às aplicações da pirólise, essa tecnologia está sendo usada para tratamento de resíduos sólidos urbanos, que podem conter inúmeras componentes sintéticas como plástico, vidro, metais, etc. que mudam a natureza do carvão produzido.

➤ Pirólise convencional, processo caracterizado por velocidades de aquecimento moderadas (20°C/s), temperaturas de reação entre 400°C e 600°C e tempos de residência entre 10 segundos e 10 minutos. Os três produtos do processo se formam em proporções similares, em volta do 30% para syngas, bio-óleo e carvão.

➤ Pirólise *Fast*, caracterizada por velocidades de aquecimento em volta dos 500°C/s e tempos de contato relativamente breves, abaixo de 2 segundos. O objetivo é maximizar a obtenção de bio-óleo, que pode chegar a 80% da biomassa em entrada. A ausência de regimes térmicos intermediários impede a formação de carvão. O bio-óleo assim obtido precisa de bastantes cuidados em fase de estocagem (evitar contato com luz, oxigênio, temperaturas acima de 50°C, etc.). O PCS desse bio-óleo pode variar entre 16 e 19 MJ/Kg, bem abaixo do poder calorífico do biogás (20 a 28 MJ/m³).

➤ Pirólise *Ultra-fast*, conduzida com velocidades de aquecimento acima de 650°C/s e tempos de contato inferiores a um segundo, obtendo assim porcentagens elevadas de syngas, principalmente hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono.

Além das variáveis consideradas acima, dependendo da tipologia dos reatores empregados, podemos ter as seguintes tecnologias (FAO, 2016b):

- Pirólise em leito fixo
- Pirólise em leito fluido
- Pirólise configurada especificamente para produção de bio-óleo

Pirólise em países desenvolvidos

A IEA, International Energy Agency, com sua divisão denominada IEA Bioenergy, dentro de seu escopo de esclarecer o caminho rumo a fontes de energia sustentável, tem determinado uma série de tarefas ou Tasks, sendo o Task 34 referente à pirólise, denominada Direct Thermochemical Liquefaction. Informações são disponibilizadas numa base de dados em relação a plantas em operação ou fase de teste, que apresentam a seguinte situação (IEA, 2016):

- Total : 39 Plantas planejadas, em fase de comissionamento ou em operação
- U.S.A.: 18 Plantas
- Canadá: 6 Plantas
- Alemanha: 5 Plantas

- Brasil: 1 Planta
- Outros: 9 Plantas

Na Figura 27 vemos uma imagem de uma dessas planta em Golden, Colorado, U.S.A:



Figura 27 – Usina de pirólise nos EUA - fonte National Renewable Energy Laboratory, USA. 2015

Pirolise no brasil

Temos pelo menos duas iniciativas relevantes para aplicações dessa tecnologia no Brasil, ambas utilizando-se de resíduos de eucalipto vindo da indústria de papel e celulose. A primeira é uma iniciativa da Fibria de Três Lagoas (MT), maior produtora de papel e celulose do país, que investiu 20 milhões de reais em 2012 para reaproveitar resíduos de suas florestas que eram descartados, a dizer folhas, cascas e gravetos de eucalipto, que antes eram descartados. A tecnologia utilizada é uma pirólise fast com prevalente produção de bio-óleo, patenteada pela Ensyn Corporation, da qual a Fibria se assegurou o uso exclusivo no Brasil. Para entrar nesse negócio a Fibria adquiriu cotas da Ensyn, empresa americana que domina essa tecnologia da pirólise fast, e produz assim um bio-óleo que,

refinado, pode substituir óleo combustível em plantas industriais. Após o refino está pronto para entrar em todos os processos hoje realizados a partir de petróleo mineral (ONDEI, V. 2012).

A segunda iniciativa é da Embrapa agroenergia em Brasília, que iniciou uma pesquisa conjunta com a ARS, Agricultural Research Service, que é a principal agência interna de pesquisa do USDA, o departamento americano para a agricultura. O substrato vem também de resíduos de eucalipto e estão sendo estudadas as variáveis de processo e de equipamento para ajustes finos nas características do bio-óleo produzido. O controle de processo com uso de catalizadores também está sendo estudado (EMBRAPA AGROENERGIA 2012).

Conclusão

Já dessa breve apresentação podemos deduzir a complexidade e o grande número de variáveis envolvidas nessa forma de tratamento da biomassa. Dessa forma a pirólise se presta para aplicações de alta seletividade em relação á biomassa empregada em função das características técnicas da planta planejada. Por isso, em vista das aplicações industriais em nível de escala comercial o que tem tido certa difusão na Europa tem sido usinas de pequeno porte, especificamente modeladas para uma tipologia definida de madeira , no caso europeu sobre tudo da espécie coníferas. Ou como vimos, aqui no Brasil, visando resíduos da cadeia produtiva do papel/celulose. Do ponto de vista das aplicações no Brasil pode se tornar relevante o aprimoramento de usinas especificamente voltadas para outras tipologias de materiais lignocelulósicos aqui abundantes, como o bagaço de cana (em briquetes ou em natura) e resíduos específicos da indústria moveleira e madeireira.

4.3 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico que se situa numa região paramétrica entre a combustão e a pirólise, em que acontece uma oxidação parcial de um material líquido ou sólido em presença de um gás comburente (ar, oxigênio, vapor de água etc.) bem abaixo da quantidade estequiométrica, com temperaturas de aquecimento entre 800 e 1000 °C em pressões atmosféricas ou maiores, até 33 bar (LORA, E.S., VENTURINI, E.J., 2012). Podemos dizer de forma muito geral que se na pirólise os produtos primários são o carvão e o bio-óleo, no gaseificação se produz principalmente um gás de síntese (syngas),

cuja composição pode variar bastante em função da biomassa em entrada, dos parâmetros de processo e da tipologia da planta.

Descrição da tecnologia

Assim como vimos para pirólise, a gaseificação é um processo complexo que se situa dentro dos limites paramétricos descritos acima, mas com ampla variabilidade da tipologia da planta e das componentes do gás de síntese produzido. Com isso não tem um tipo ideal de gaseificador, entre os vários que veremos abaixo. Com o auxílio de um gás comburente nas proporções citadas acima a reação transforma o carbono contido na biomassa em diferentes gases que vão a compor o syngas de saída, conforme a Figura 28:

BIOMASSA EM ENTRADA	MEIO COMBURENTE	GÁS PRODUZIDO
CARBONO	Oxigênio 1/2 O ₂	CO
	Vapor H ₂ O	CO + H₂
	Dióxido de carbono CO ₂	2CO
	Hidrogênio H ₂	CH₄
	Ar (21% O ₂ e 79% N ₂)	CO + N

Figura 28 – Produtos da gaseificação de biomassa - Fonte Francescato, 2013, adaptado.

Outros hidrocarbonetos como eteno (C₂H₄) e etano (C₂H₆) podem entrar na composição do gás síntese produzido. Os fatores que influenciam o resultado da gaseificação em termos de qualidade do syngas produzido são (LORA, E.S., VENTURINI, E.J., 2012):

- A razão da equivalência (ER), conhecida como *fator de ar*, que indica a quantidade de oxigênio fornecido em relação à biomassa em entrada, que no caso da gaseificação se situa em faixas intermediárias entre 0 e 1.
- O tipo de agente de gaseificação
- A temperatura
- O tempo de residência que depende do tipo de reator utilizado
- As características termoquímicas e energéticas da biomassa em entrada
- A utilização ou não de catalizadores

Dependendo da combinação desses fatores as características de composição do *syngas* podem variar bastante, impondo restrições em relação tanto à biomassa em entrada quanto aos motores usados e suas relativas calibragens, conforme a Tabela 9:

Tabela 9 – Composição do syngas -Fonte: elaboração própria de ENEA, 2013

COMBURENTE	COMPOSIÇÃO DO SYNGAS SECO (% do volume)						PCI (MJ/Nm ³)	EMPREGOS DO SYNGAS
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂ H ₄		
AR	9 -- 10	12-- 15	14 -- 17	2 -- 4	56 -- 59	< 1	3.8 - 4,6	COMBUSTÍVEL
OXIGÊNIO	30 -- 34	30 -- 37	25 -- 29	4 -- 6	2 -- 5	< 1	9 -- 10	COMBUSTÍVEL/CHEMICALS
VAPOR (H ₂ O)	32 -- 41	24 -- 26	17 -- 19	10 -- 12	2 -- 5	2 -- 3	12-- 13	COMBUSTÍVEL/CHEMICALS

Os diferentes modelos de gaseificadores se distinguem principalmente por (FRANCESCATO, V. (2013):

- A tipologia de contato entre o meio gaseificante e a biomassa
- O fonte de calor disponível (interna ou externa)
- O tipo de meio gaseificante
- As condições de pressão do reator

Dependendo da combinação desses fatores, a Tabela 10 apresenta 3 tipos de gaseificador mais comumente usados:

Tabela 10 – Tipos de gaseificadores - Fonte Lora, 2012

Tipo de reator	Direção de fluxo		Fonte de calor
	Combustível	Gases	
Leito fixo contracorrente (<i>Updraft</i>)	Descendente	Ascendente	Combustão do resíduo de carbono
Leito fixo cocorrente (<i>Downdraft</i>)	Descendente	Descendente	Combustão parcial dos voláteis
Leito fluidizado borbulhante e circulante	Ascendente	Ascendente	Combustão parcial dos voláteis e do resíduo de carbono

Além dessas quatro configurações temos mais duas, menos usadas, que são:

- Leito fixo tipo fluxo cruzado
- Leito arrastado

Tabela 11 – Syngas em função do gaseificador - Fonte Lora, 2012

Parâmetro	Leito fixo contracorrente	Leito fixo cocorrente	Leito fluidizado circulante
CO, % em vol.	15-20	10-22	13-15
H ₂ , % em vol.	10-14	15-21	15-22
CH ₄ , % em vol.	2-3	1-5	2-4
CO ₂ , % em vol.	8-10	11-13	13-15
PCI, MJ/kg Base seca	3,7-5,3	4,0-5,6	3,6-5,9

Dependendo principalmente da variação do agente comburente e da tipologia da planta podemos assim caracterizar as especificação do syngas produzido (LORA, E.S., VENTURINI, E.J., 2012) conforme as Tabelas 10 e 11. Vemos das duas tabelas acima que há uma variabilidade bastante ampla na composição do syngas, sobretudo relativamente a componente hidrogênio e metano, em função do comburente. Uma comparação com a variabilidade do biogás, limitada basicamente às duas componentes principais (CH₄ e CO₂) explica em parte porque a biodigestão anaeróbia tem encontrado extensa aplicação em nível comercial enquanto que a gaseificação, como a pirólise, está ainda em fase piloto ou limitadas a aplicações restritas a biomassas com características bem determinadas, como no caso da madeira de coníferas na Europa.

Quanto à utilização do gás de síntese a variável discriminante principal é o poder calorífico ligado à composição de saída, podendo haver emprego como combustível ou na indústria química, conforme ilustrado na Figura 29 (BARISANO, CANNETO, 2013):

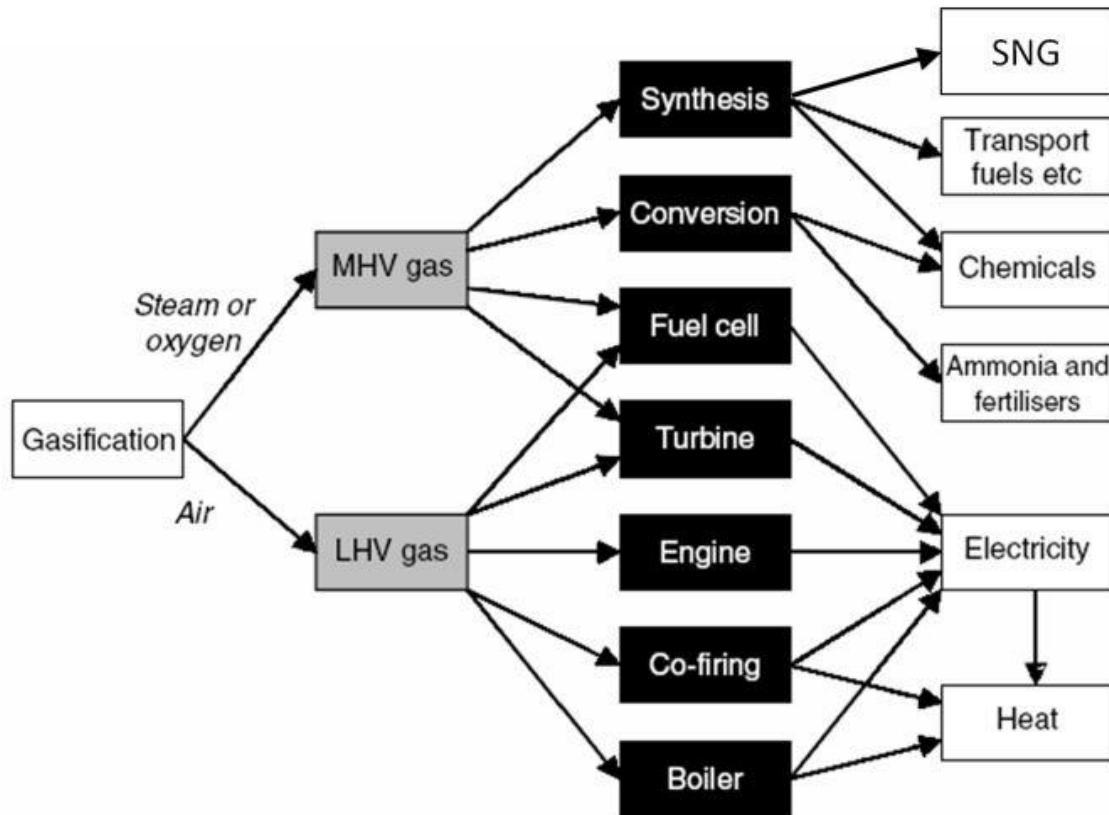


Figura 29 – Usos do syngas - Fonte Barisano, Canneto, 2013.

Relativamente à limpeza do gás produzido há também várias possibilidades, visando principalmente a remoção de material particulados e alcatrões gerados pelo processo. Ambos estes materiais são prejudiciais ao uso em máquinas térmicas (MACI diesel e Otto ou TG), sendo que os segundos são misturas complexas de hidrocarbonetos condensáveis. Já se o syngas é usado só para produção de calor pode não ser necessária a limpeza.

No que tange o objeto desse estudo a biomassa é considerada principalmente em relação ao seu potencial energético e no caso de resíduos orgânicos, ao seu impacto ambiental (poluição e geração de GEE). Com isso nos interessa abordar a questão do uso do gás de síntese para produção de energia elétrica.

Na Tabela 12 vemos uma apresentação sinótica das possíveis aplicações do gás de síntese à geração elétrica, dependendo de vários fatores como a faixa de potência instalada

e a tecnologia de geração, conforme as seguintes siglas: MACI (Motores Alternativos de Combustão Interna); MS (Motores Stirling); MTG (Microturbinas a Gás); TG (Turbinas a Gás); CC (Células a Combustível); CV (Ciclo a Vapor); ORC (Ciclo Orgânico Rankine); BIG-GT (Sistema Integrado de Gaseificação de Biomassa com Turbinas a Gás):

Tabela 12 – Aplicações do syngas à geração elétrica - Fonte Lora, 2012

Faixa de potência, kW _e	Tecnologia	Maturidade tecnológica			Disponibilidade comercial			Comentários
		A	M	B	A	M	B	
5-200	Gaseificação/MACI		X			X		Poucas ofertas comerciais e projetos de sucesso
	Gaseificação/MS			X			X	P&D
	Gaseificação/MTG			X			X	P&D
	Combustão/MS		X				X	Alguns projetos demonstrativos
	Combustão/MTG (queima externa)		X				X	P&D
	Gaseificação/CC			X			X	P&D
	Biodiesel/MACI	X			X			Comercial
200-1 000	Combustão/CV	X				X		Comercial, baixa eficiência
	Gaseificação/MACI		X			X		Poucas ofertas comerciais e projetos de sucesso
	Gaseificação/CC			X			X	P&D
> 1 000	Combustão/CV	X			X			Comercial
	ORC – Ciclo Orgânico Rankine		X				X	Unidades demonstrativas e comerciais, alto custo
	Gaseificação/TG (BIG-GT)		X				X	Unidades demonstrativas abandonadas
	Gaseificação-CC			X			X	P&D

Gaseificação em países desenvolvidos

Tomaremos aqui o exemplo da Itália para delinear a perspectiva e pujança dessa tecnologia de aproveitamento energético de biomassa lignocelulósica. Nesse país existem várias plantas operando em nível industrial por essa rota, conforme apresentado no Quadro 2:

Quadro 2 - Plantas de gaseificação de biomassa na Itália – Fonte ENEA, 2012

Impianto	Potenza (kWe)	Produttori	Caratteristiche dell'impianto
Belluno(BL)	1000	GAS-1000 MODEL	L'impianto è alimentato con 8500 t/a di cippato di legno
Parma	1000		L'impianto produce 7.5GWhe e 15GWht ed è alimentato con 9000 t/a di kenaf
Gadesco Pieve(CR)	960	Agroenergia	Pirogassificatore alimentato con cippato di legno
Alessandria	640		Impianto sperimentale alimentato con circa 4100 t/a di biomasse agroforestali
Vigevano(PV)	500	Modello GAS-500	L'impianto produce 3.75GWhe e 7.5 GWht and alimentato con 4100 t/a di cippato
Caluso(TO)	400	Autogas Nord	L'impianto è alimentato con residui forestali
Oltrepo Pavese(PV)	300	Bio&Watt	Gassificatore a letto fisso con accoppiati Motori a combustione interna
Castel San Pietro(BO)	250	Bio&Watt	Gassificatore a letto fisso con accoppiati Motori a combustione interna
Orzinuovi(BS)	250	Bio&Watt	Gassificatore a letto fisso con accoppiati Motori a combustione interna
Verbania	250	CoVer Energy	Pirogassificatore Impianto classificato sperimentale

O tamanho e a eficiência de transformação da biomassa em energia elétrica são interessantes e financeiramente viáveis no caso de madeira residual ou de baixo custo (cavacos, serragem etc). Também sistemas de feed-in tariffs como acontece na Europa ou de net metering no caso do Brasil (Res. Norm 867/2015) se tornam necessários para viabilizar financeiramente esse tipo de geração distribuída. Conforme esse levantamento de uma agência pública de pesquisa energética, novas tecnologias e desenvolvimento sustentável, o ENEA, quando comparado com o uso de biomassa para fins energéticos pela rota da combustão, que gera anualmente 2.828 GWh elétricos, a rota da gaseificação está ainda em fase embrionária aguardando avanços tecnológicos, totalizando hoje uma potência

instalada de 20 MW, o que corresponde aproximadamente a 150 mil MWh produzidos anualmente. (BRACCIO, G. 2012).

Gaseificação no Brasil

Quanto visto no paragrafo precedente em relação à Itália pode explicar a ausência de aplicações industriais de uma certa relevância no Brasil. Todavia plantas piloto ou de pequeno porte estão sendo avaliadas por órgãos de pesquisa como o CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa (APOLINÁRIO, S.M. 2004). As biomassas testadas são cavaco de eucalipto, casca de cupuaçu, pellets de resíduos de eucalipto e endocarpo de babaçu. Os projetos GASEIBRAZ e GASEIZAMAZ, financiados por vários órgãos federais e estaduais em Timbó (AM), demonstra que essa rota pode ser uma alternativa para geração distribuída de pequeno porte sobretudo em áreas rurais e servidas por sistema elétrico isolado. Na Figura 30 abaixo a instalação a instalação realizada pelo CENBIO:



Figura 30 – Usina de gaseificação de biomassa no Brasil - Fonte CENBIO

5. MODELAGEM DA BASE DE DADOS

As questões abordadas para modelagem dessa Base de Dados são as seguintes: análise do software; fontes de alimentação de dados; tipificação dos resíduos; carregamento de dados agrupados e dados pontuais; atualização dos dados; viabilidade da coleta dos dados.

5.1 Análise do software

Podemos entender por banco de dados qualquer sistema que reúna e mantenha organizada uma série de informações relacionadas a um determinado assunto em uma determinada ordem. Já um Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacionais (SGBDR) é usado para armazenar as informações de uma forma que permita às pessoas examiná-las de diversas maneiras. (MACORATTI.NET, 2016). Um Banco de Dados não é uma simples arquivagem de informações mas uma coleção estruturada de dados sobre um determinado contexto (biomassa residual, no nosso caso), cuja criação, manipulação e consulta é viabilizada por meio da lógica contida no conjunto formado pela modelagem relacional e pelas regras inclusas em seu Sistema Gerenciador (no software que gerencia este banco). Os dados que alimentam o banco têm uma finalidade específica, grupos delimitados de usuários e regras de cadastro e funções de consulta, todos definidos na fase de modelagem do banco de dados e de seu sistema gerenciador. A ideia intuitiva, quanto à forma como os dados são armazenados, é análoga a de um depósito, como, por exemplo, um almoxarifado com suas normas de armazenamento, retirada e regras de acesso dos usuários. Tudo isso, no banco de dados, chamamos de SGBD, Sistema de Gerenciamento do Banco de Dados.

A primeira escolha que operamos foi entre um banco de dados *Relacional* e um *Textual*. Listamos abaixo os motivos que sugeriram uma maior aptidão do modelo relacional (MACÁRIO, MONTEIRO BALDO, 2005); (ROCHA da COSTA, 2011):

- a. Capacidade de cruzar dados de fontes diferentes seguindo um padrão relacional. Essa capacidade de criar relacionamentos lógicos entre os dados, como se faz entre linhas e colunas de uma planilha excel, é o que interessa para elaboração de dados sobre biomassa residual.
- b. Baixa incidência, na nossa coleção de dados, de textos livres e/ou imagens, nos diferentes formatos de arquivos existentes no mercado (PDF, etc.) o que indicaria para uma

Base de Dados Textual. O trabalho de importação de quantidades significantes de dados para uma base relacional pode ser simplificado. É possível criar rotinas específicas para percorrer determinadas tabelas de excel colhendo estes dados e inserindo-os corretamente na base.

c. Contexto relativo à geração de biomassa residual relativamente constante, se beneficiando da caracterização de relação de conjunto dos bancos de dados relacionais

d. Possibilidade de vários usuários estarem logados ao mesmo tempo no sistema, que aponta para o modelo relacional. Sua estrutura de insert vai guardar somente dados atômicos e mesmo guardando documentos em outros formatos, o banco relacional não realiza pesquisas dentro dos mesmos. Com isso não precisa converter arquivos diferentes, como textos ou imagens, para o seu padrão de armazenamento, o que resulta em uma maior velocidade de processamento das entradas de dados simultâneos. Por possuir essa estrutura de cadastro mais simples, um banco relacional consegue realizar cadastros com uma velocidade um pouco maior a de um banco textual. Relativamente à metodologia para gerenciamento e desenvolvimento do projeto optamos pelo Extreme Programming, adaptado conforme os recursos disponíveis (GABRIEL W., 2016).

A escolha do banco relacional tem comportado a opção para a linguagem SQL-Structured Query Language, a mais eficiente para esse tipo de banco. A SQL serve tanto para a criação de tabelas e regras de relacionamentos quanto para a inclusão, atualização, exclusão e principalmente recuperação de dados. Ela permite cruzar os dados em tempo de pesquisa de forma a trazer somente os que atendem aos requisitos da busca. Existe a linguagem SQL padrão, conhecida com o Ansi SQL, que é a versão utilizada pelo MariaDB/Mysql. Existem também variações da linguagem SQL criada por determinados fabricantes. Em nosso protótipo escolhemos o SGDB conhecido como MariaDB/Mysql¹⁷. Os motivos dessa escolha se resumem nos seguintes pontos:

¹⁷ Este banco de dados é conhecido por sua facilidade de uso, sendo ele usado pela NASA, HP, Bradesco, Sony, e muitas outras empresas. Sua interface simples, e também sua capacidade de rodar em vários sistemas operacionais, são alguns dos motivos para este programa ser tão usado atualmente.

- a. É um dos SGDBs mais utilizados no mundo. Em termos de web e hospedagem de sites é, sem dúvida, o mais utilizado. Também muito utilizado em sistemas comerciais, ERPs ¹⁸ e outros.
- b. Continua OpenSource.
- c. Oferece suporte a vários sistemas operacionais como o Linux, MS-Windows, entre outros
- d. É pequeno, se comparado a outros SGDBs como o MS-SQL Server, Oracle e DB2 e tem alto desempenho sendo capaz de operar várias bases de dados de sistemas diferentes concorrentemente e com grau de segurança satisfatório.
- f. É extremamente robusto e confiável: raramente apresenta panes ou falhas de segurança.

5.2 Tipificação de resíduos

Relativamente aos sistemas de tipificação e classificatórios dos resíduos, harmonizamos essa base de dados à Lista Brasileira de Resíduos Sólidos, presente na Resolução Normativa n.13/2012 do IBAMA (IBAMA, 2012), atribuindo aos resíduos orgânicos que interessam a biodigestão anaeróbia os relativos códigos dessa lista.

Outra referência que observamos nessa proposta é a Norma Brasileira NBR-ABNT 10004/2004 (ABNT-NBR 2004), para conferência de que todos os dados cadastrados nessa base de dados refiram-se necessariamente a Resíduos Classe IIA, resíduos não perigosos não inertes. Além disso os resíduos cadastrados deverão ser isentos de componentes listadas nos anexos da mesma norma, como Resíduos Perigosos de Fontes Específicas e Resíduos Perigosos de Fontes não Específicas (Anexos A e B), Substâncias que Conferem Periculosidade aos Resíduos (Anexo C) e de Substâncias Tóxicas (Anexo E).

Nessa base de dados também é contemplado o sistema de codificação da Resolução n. 313/2002 do CONAMA, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais (CONAMA 2002)..

O código CNAE, conforme classificação do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE, 2015), é puxado automaticamente pelo sistema na hora de cadastrar dados, para identificação da atividade econômica geradora dos resíduos.

¹⁸ ERPs, Enterprise Resource Planning, são softwares de gerenciamento integrado de processo de negócio, que integram todas as facetas de uma operação, como planejamento de produto, vendas, marketing, etc., em uma única base de dados, aplicativo e interface usuário.

O código CTF/APP (IBAMA, 2015), relativo ao Cadastro Técnico Federal para Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais, também é puxado automaticamente pelo sistema, atrelado à caracterização da atividade geradora dos resíduos orgânicos em vista de possível utilidade no cruzamento com sistemas de informação do IBAMA. Esse esforço de harmonização com os sistemas classificatórios vigentes, além de devido, aponta para a possibilidade de uma extensão da base de dados a outros contextos tecnológicos, o que seria desejável, mantendo homogeneidade na terminologia.

Finalmente um código próprio é gerado pelo sistema, que possibilita a classificação diferenciada dos 180 substratos listados como compatíveis com a tecnologia em questão (os outros sistemas de codificação acima citados são as vezes repetitivos, agrupando substratos diferentes sob um mesmo código).

Todavia, para atender a s exigências específicas dessa Base de Dados, voltada para uma tecnologia específica, precisamos operar uma seleção dos substratos de biomassa residual compatíveis com a biodigestão anaeróbia, além de atribuir a cada substrato um código específico diferenciado, que as classificações existentes não oferecem. Como consta no Anexo, foram selecionados portanto 180 diferentes categorias de resíduos orgânicos, vindo de 4 grandes categorias que são:

- Origem Animal
- Origem Vegetal
- Resíduos urbanos e saneamento
- Outros

Por sua vez essas categorias são ulteriormente divididas em 18 subcategoria, oferecidas ao usuário para agilizar tanto a fase de cadastro como a de consulta:

- Dejetos animais
- Lodos de tratamento de efluentes industriais (animais)
- Lodos de lavagens de estabelecimentos (animais)
- Processamentos industriais (animais)
- Indústria do couro
- Lodos de tratamento de efluentes industriais (vegetais)
- Lodos de lavagens de estabelecimentos (vegetais)

- Processamentos industriais (vegetais)
- Produção silvícolas e floricultura
- Indústria madeireira
- Processamento de Frutas e Hortaliças (incluído sucos)
- Processamento de cereais, grãos, legumes, etc. (lavouras temporárias)
- Indústria doceira
- Indústria confeitaria
- Indústria de bebidas (excluído chá, café e cacau)
- Resíduos ETE e ETRAs
- RSU e FORSU
- Limpeza urbana e saneamento

Na categoria Outros são incluídas algumas biomassas que a rigor fogem da classificação como resíduos, como os ensilados, gramíneas e forrageiras frescas, entre outros: isso se justifica pelo fato que é muito difuso, no estado da arte da biodigestão anaeróbia, a prática de misturar, na dieta dos biodigestores de alto rendimento, substratos de natureza residual com outros incluídos nessa categoria, em processo chamado de co-digestão. Com isso as informações relativas à disponibilidade desses substratos, em determinada localidade, podem ser de grande utilidade para o planejamento de usinas desse tipo.

Vale ressaltar que essa tipificação, apesar de sujeita a modificações, correções e adendos, é de fato uma contribuição original no panorama dos estudos acadêmicos sobre a biodigestão anaeróbia. Procuramos sem sucesso, antes de propor nossa listagem fruto de conhecimento pessoal técnico e de campo em usinas de biogás, uma lista de resíduos e materiais que pudesse servir de base para nossa elaboração e relativa base de dados. Com isso enveredamos para extrair extensa e não tão detalhada lista do Ibama os matrizes de interesse da nossa tecnologia, integrando os dados classificatórios com listagens e detalhamentos retirados de outros estudos como a PAM – Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2012), o Censo Agropecuário (IBGE, 2014) e o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (IBGE, 2016), além de outros levantamentos relativos ao gerenciamento de resíduos sólidos (IPEA, 2012^a), (IPEA 2012b), (IPEA, 2012c) e ao saneamento básico para produção de lodos (CETES, 2006), (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014).

5.3 Dados estatísticos e dados pontuais

Existem, em relação às informações sobre resíduos orgânicos, duas fontes diferenciadas que essa base de dados se propõe de integrar. De um lado os dados estatísticos disponibilizados por várias fontes e órgãos públicos e privados. Do outro dados de geração pontual serão fornecidos por usuários do sistema, pessoas físicas ou jurídicas. A solução escolhida nessa modelagem é proporcionar ao usuário, em fase de consulta, o acesso aos dois tipos de informação, auxiliados em fase de consulta pelas interfaces gráficas que veremos no próximo capítulo. Relativamente aos dados de caráter estatístico, será tarefa do administrador do sistema a análise periódica de todos os dados disponibilizados sobre o assunto, que serão elaborados e disponibilizados para os usuários. As fontes de informação que alimentarão o cadastro de dados estatísticos são órgãos públicos e privados, instituições de pesquisa, centros de estudos e outras fontes tidas como confiáveis pelos administradores do sistema, em parte citadas na bibliografia, como IBGE, EPE, IPEA, Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, entre outros.

Já o carregamento de dados pontuais, a dizer dados relativos à produção de determinados montantes de biomassa residual, em uma determinada localidade/atividade económica, dependerá exclusivamente dos usuários que se cadastrarem e conectarem ao sistema, de forma voluntária. Como veremos no próximo capítulo, o carregamento de dados será facilitado, em fase de cadastro, por um sistema ágil e simplificado, que guiará o usuário na caracterização e localização das informações que deseja disponibilizar. A questão da motivação dos usuário para realização de cadastros também foi levada em conta, conforme veremos no próximo capítulo, onde o protótipo colocado em rede é apresentado.

6. O MODELO REAL DA BASE DE DADOS RELACIONAL PROPOSTA

Vale lembrar que, de partida, essa modelagem de dados não possui dados armazenados. Ela apenas representa a forma de como será organizada a persistência dos dados reais quando o sistema entrar em operação, na fase experimental. Em nosso modelo teórico apenas temos o projeto de como as prateleiras do almoxarifado deverão ser montadas e organizadas e da natureza dos objetos que lá serão alojados. As prateleiras serão criadas pelo SQL no SGBD seguindo o planejamento proposto. Operando uma harmonização entre os substratos de interesse da biodigestão anaeróbia e as classificações apresentadas no parágrafo 2, chegamos a um sistema de tipificação de cerca de 180 diferentes resíduos orgânicos, organizados em 4 macro-categorias :

1. Origem Animal (5 subcategorias)
2. Origem Vegetal (10 subcategorias)
3. Resíduos Sólidos Urbanos e Saneamento (3 subcategorias)
4. Outros

A partir dessa ordenação, realizada em planilha Excel, a arquitetura de nosso modelo relacional foi realizada utilizando uma ferramenta CASE ¹⁹, o SQL Power Architect, utilizando a notação pé de galinha. Uma visão gráfica é apresentada na Figura 31:

¹⁹ CASE – Computer Aided Software Engineering, é um termo genérico que indica todas as ferramentas automatizadas que auxiliam o desenvolvedor de sistemas em uma ou várias etapas de desenvolvimento do sistema.

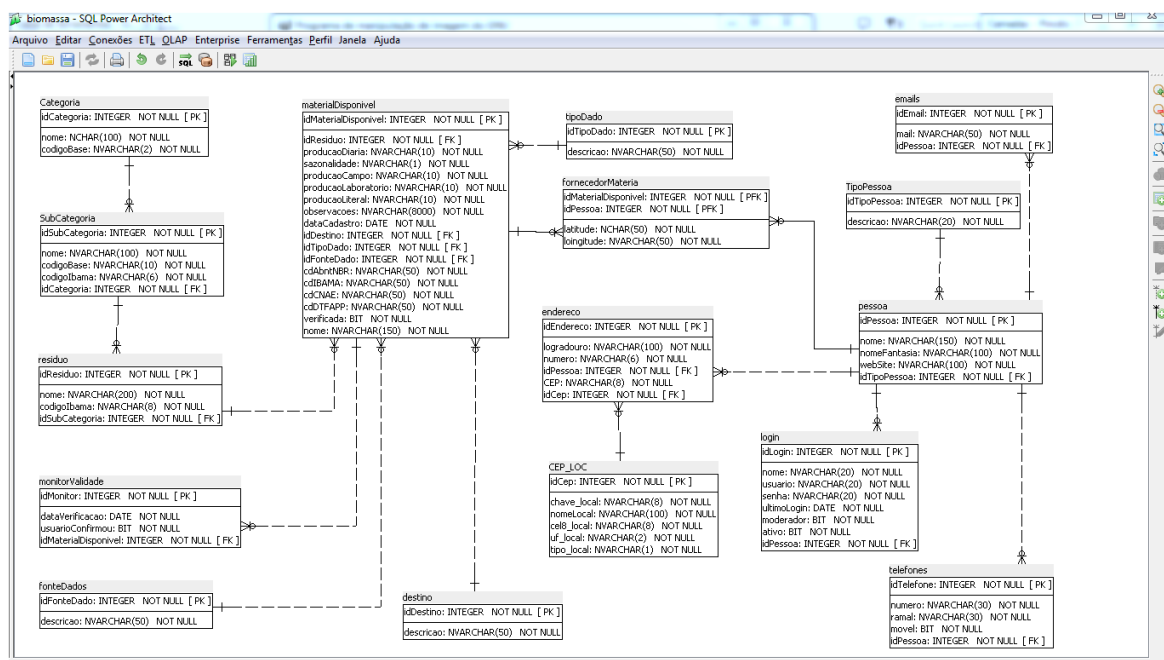


Figura 31 Modelo Relacional da Base de Dados – Fonte: elaboração própria

Ao passar da primeira modelagem, feita por meio de planilhas excel, para a consideração da modelagem da Figura 31, é importante relevar que as informações fornecidas pelo Banco de Dados não são contidas em cada tabela dessa modelagem, da forma que acontece, sinoticamente, nas planilhas excel. Nesse caso o que as tabelas apresentadas na Figura 31 contêm são dados, sendo que as informações serão fruto de várias quebras e relacionamentos operados pela lógica envolvida na modelagem dos dados e na programação do sistema prototípico.

6.1 Sistema de cadastro

A Base de Dados está estruturada para receber dois tipos de informação relativa à biomassa residual:

a. Dados pontuais sobre a geração, fornecidos por usuários cadastrados, pessoa física ou jurídica, conforme protocolo de cadastramento e carregamento de dados fornecido pelo sistema. São dados localizados e pontuais que dizem respeito à geração de determinados montantes de biomassa residual de possível interesse para projetos específicos biodigestão anaeróbia.

b. Dados estatísticos agregados, hauridos e disponibilizados pelo administrador do sistema, basicamente por via de uma análise crítica de todas as informações disponíveis por levantamentos e estudos de órgãos públicos e privados como IBGE, EPE, IPEA, Ministérios e outros, listados em parte nas referências bibliográficas. Os dados poderão portanto informar sobre realidades municipais, estaduais ou federais, precisando de elaboração para extrapolação de informações que sejam relevantes em relação à finalidade específica dessa base de dados. Os dados, por exemplo, disponíveis na PAM – Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE, são relativos às produções de determinadas categorias de vegetais cuja colheita e processamento origina biomassas residuais de interesse da biodigestão anaeróbia, resíduos que, todavia, não são informados na própria PAM, precisando com isso de extrapolação operada pelo administrador do sistema com base em critérios específicos ²⁰.

²⁰ Por exemplo, a quantidade de casca e palha resultantes do beneficiamento de uma tonelada de café, ou outras interpolações que serão objeto das atividades de elaboração de dados estatísticos por conta dos administradores do sistema.

Biomassa Residual Brasileira

Área Restrita
Login: Senha:

Cadastro

Categorias:

Resíduo:

Matéria:

Região:

Fornec.:

Destino:

Fonte:

Lograd.:

Notas:

Busca Avançada:

Categorias:

Resíduo:

Matéria:

Região:

Fornec.:

Destino:

Fonte:

Lograd.:

Figura 32 Wireframe do formulário de cadastro - Fonte elaboração própria

Conforme ilustrado na Figura 32, o sistema oferece a seus usuários um formulário simples de cadastro dos dados georeferenciados de biomassa residual. Somente usuários logados poderão realizar cadastros e carregamento de dados específicos de geração. Somente o administrador do sistema poderá cadastrar dados estatísticos regionais ou nacionais. Ao realizar o cadastro, o usuário poderá optar por digitar o endereço manualmente ou poderá arrastar um cursor no mapa e o endereço será coletado automaticamente. Serão geradas automaticamente as coordenadas geográficas do ponto de produção. Caso opte por digitar o endereço manualmente, o cursor será levado para as coordenadas do endereço digitado e o mapa dará um zoom sobre a região de interesse. Se o usuário desejar, poderá com a ajuda do mouse, arrastar o formulário de cadastro para o canto, com a finalidade de expor a visualização, no mapa, do endereço selecionado.

Para listagem completa de todas as categorias de resíduos orgânicos entre as quais o usuário poderá escolher para caracterização de seu carregamento, consulte-se a folha excel reproduzida no Anexo.

Relativamente aos atributos que, junto com as categorias de resíduos formam esse sistema de relações, foi previsto que sejam informados, em fase de Cadastramento, as seguintes informações:

1. Dados de usuário PF ou PJ com relativa senha de acesso.
2. Um logradouro que, automaticamente, remete a um CEP, um Município e às coordenadas geográficas, usando a Interface de Programação de Aplicativos APIs do Google Maps (GOOGLE INC., 2016).

Em fase de carregamento dos dados sobre a biomassa residual será informado o seguinte:

1. A produção diária em toneladas do resíduo cadastrado.
2. A produção anual em toneladas do resíduo cadastrado.
3. A sazonalidade da geração em termos de números de meses/ano.
4. O destino atual do resíduo cadastrado, em forma de escolha entre as seguintes opções: lixão, aterro controlado, aterro sanitário, compostagem, produção de ração animal, produção de alimento humano, produção de fertilizantes, queima, pirolise, gaseificação, rotas oleoquímicas (biodiesel etc.), rotas bioquímicas (etanol etc.), biodigestão anaeróbia, outros.
5. Notas adicionais consideradas relevantes pelo usuário.

Os dados analíticos indicarão portanto de forma geograficamente especificada (coordenadas) uma determinada produção de biomassa residual, ligada a um processo civil ou industrial específico.

6.2 Sistema de consulta

A fim de facilitar a consulta dos dados, oferecemos um formulário simples, porém bastante completo. Ao acessar o site, todos os dados estatísticos a nível nacional estarão expostos no sistema na forma de cursores no mapa. Ao clicar em determinado cursor, será aberto um pequeno pop-up com uma amostra do dado. Caso o usuário se interesse mais por este determinado dado ele terá um link para clicar e um pop-up maior com a informação na íntegra será apresentado. Para selecionar a quantidade de cursores de dados exibidos no mapa o usuário poderá usar os filtros localizados à direita do mapa. Ao selecionar dados de um estado ou município automaticamente o mapa dará um zoom sobre a região de interesse. Estes filtros também poderão ser utilizados para alternar entre dados regionais e

dados pontuais, de fornecedores de matérias-primas. A Figura 33 abaixo mostra o wireframe de abertura do sistema de consulta acima exposto:

Figura 33 Wireframe proposto para formulário de consulta – Fonte elaboração própria

6.3 Motivação para cadastro de usuários e consultas

O autor deu continuidade a esse trabalho colocando online um protótipo para testar o funcionamento do sistema e disponibilizar um primeiro lote de dados estatísticos para o serviço de consulta, dados que, como já foi dito, serão hauridos e elaborados pelo administrador do sistema a partir de várias fontes, em parte citadas na bibliografia (ABRELPE,2014), (IPEA, 2102a), (IPEA, 2102b), (IPEA, 2102c), (EPE/MME, 2014b), (EPE/MME, 2014c), (IBGE, 2012), (IBGE, 2014), (IBGE, 2016), Diferentes ferramentas informáticas e de marketing digital para dar visualização ao site serão adotadas, escolhidas entre as ferramentas SEO (otimização para motores de busca) ²¹. Ao abordar a fase de carregamento de dados pontuais no sistema, todavia, deve ser levada em conta a questão da motivação dos usuários em fornecer essas informações. Os usuários responsáveis para

²¹ SEO – Search Engine Optimization indica o conjunto de estratégias de processamento voltadas para afetar positivamente a visibilidade de um sítio web na rede mundial.

alimentar o sistema com esses dados são geradores de resíduos orgânicos, para os quais esses montantes podem ser ao mesmo tempo um problema, um custo, ou, em alguns casos, até uma fonte de renda. Por outro lado existem operadores, públicos ou privados, para os quais as informações sobre a disponibilidade de biomassa residual têm valor para suas práticas de negócio ou gestão, podendo se tornar uma fonte de renda ou viés para operação de boas práticas. Em outras palavras, o que é para o meio ambiente um passivo e para o gerador de resíduos um custo, caso em que, por exemplo, deva dispor seus montantes em aterros sanitários, pode se tornar uma fonte de boas práticas ou negócio para outros operadores, que detêm know-how e tecnologias apropriadas. Com isso um corte de gastos ou até um lucro pode ser gerado para o proprietário da biomassa residual, ao mesmo tempo em que um negócio ou um bom gerenciamento pode ser viabilizado. A viabilização do contato entre essas duas figuras de usuários será a principal fonte de motivação para o cadastramento de dados pontuais pelos usuários: a disponibilização de dados estatísticos hauridos e elaborados será mais um auxílio para esse contato, pois atrairá usuários em fase de consulta. As duas formas de utilização do sistema, via cadastramento de dados e via consulta, poderão assim formar um ciclo virtuoso para seu funcionamento, pois os cadastradores de dados serão motivados pela presença de usuários em consulta e vice-versa. Paralelamente, em forma de reforço motivacional, será cura dos administradores do site proporcionar aos usuários uma vantagem em termos de imagem, como um selo verde de vocação para sustentabilidade, ligado à transparência com que eles disponibilizam as informações sobre seus resíduos orgânicos e à utilidade dessa postura em função da preservação do meio ambiente e da mitigação das mudanças climáticas.

6.4 Sistema de atualização da base de dados

A questão da atualização das informações fornecidas pelo sistema de consulta é modelada da seguinte forma:

a. Dados estatísticos

O administrador do sistema atualizará anualmente os dados hauridos pelas várias fontes de informação. Caso não haja informação anual disponível e em caso de dados com cadência plurianual de publicação ou informação, será indicada a data de origem da informação

b. Dados cadastrados pelos usuários

Na operação de cadastramento o usuário informará, além dos outros dados cadastrais, a própria e-mail de contato. Ao se aproximar o vencimento de um ano a partir da data de carregamento dos dados, será gerada automaticamente uma e-mail de solicitação da atualização dos dados carregados. No caso em que o usuário, ao vencer o período de um ano, não tenha atualizado os dados, estes serão disponibilizados com a informação complementar sobre a data de carregamento, alertando o usuário de consulta sobre a possível desatualização das informações. Em qualquer momento o usuário poderá atualizar suas informações, recolocando os dados informados no modo atualizado.

7. CONCLUSÃO

Relativamente á análise das diferentes tecnologias que embasa esse esforço de modelagem em função do biogás podemos afirmar que de fato, no tocante à biomassa moderna, de natureza principalmente residual (destinada ao saneamento básico e aterros sanitários) e ocasionalmente subproduto (indústria alimentícia, agronegócio, etc), a biodigestão anaeróbia pode ser considerado o caminho eletivo e, teoricamente, a melhor rota para um correto tratamento, reaproveitamento e, eventualmente, disposição final. Isso tanto em termos sanitários-ambientais quanto em termos energéticos. A comparação apresentada no Cap. 3 (PRETO, 2010), relativa a essas variáveis ambientais, tecnológicas e energéticas, confirma essa visão. Teoricamente ainda porque a viabilidade logística e financeira, a carência de conhecimento e know-how difusos em âmbito brasileiro e, principalmente, a falta ainda em nível governamental de incentivos, tornam a implantação desse tipo de usinas ainda fatos esporádicos no Brasil, sobretudo em nível urbano. A componente úmida dessa tipologia de resíduos, apresentando porcentagem de água a partir de 70% para cima, é um fator chave para escolha dessa rota em relação a outras. Já a aplicação da biodigestão anaeróbia à biomassa tradicional como madeira residual e outros lignocelulósicos (casca de arroz, bagaço de cana, capins, serragem, etc.) não é indicada pelos problemas apresentados na fase de quebra das macromoléculas e disponibilização de celulose e hemicelulose ao processo (C5 e C6, açúcares de 5 e 6 átomos de carbono). No estado atual da tecnologia uma fase hidrolítica incrementada, que disponibilizaria importantes parcela dessas componentes separadas da lignina, esbarra em altos custos em escala industrial, apontando para esse tipo de resíduos rotas como a queima, a pirólise e a gaseificação. Com isso na base de dados apresentada os resíduos lignocelulósicos estão presente em pequena parte em função do fato que as vezes eles vêm misturados com resíduos orgânicos de maior volatilidade, como no caso de resíduos de parques e jardins. Portanto o planejador deverá considerá-los em função de manobras de separação ou de uso paralelo em rotas complementares à biodigestão anaeróbia, por exemplo acoplando no mesmo sítio a produção de biogás e a queima em caldeira de biomassa lignocelulósica, ambas as rotas levando a produção de energia elétrica.

Dito isto o foco principal do trabalho continua sendo a modelagem de uma ferramenta que auxilie o planejador e o empresário na avaliação da viabilidade de uma

usina de biodigestão anaeróbia em determinado local e/ou com determinados montantes de resíduos orgânicos. Se torna essencial saber onde os resíduos são gerados qual a natureza deles e finalmente a quantidade. Devido à natureza intrinsecamente distribuída dessa tecnologia, que vê na ordem de 1 a 10 MWe o tamanho das usinas elétricas instaladas, a questão do local de geração e da logística de abastecimento da planta é primordial para o estudo de viabilidade. Em relação a isso acreditamos que o estudo tenha lançado uma ideia em forma de protótipo que poderia ser retomada por órgãos de pesquisa e administradores público, para integração nos sistemas existentes e maior poder de acesso a dados de pesquisas e cadastrais, tanto para parte estatística quanto para parte de cadastro pontual de informações. A Resolução CONAMA 313 de 2002, por exemplo, que prevê um Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, aponta para esse caminho e para definição dos instrumentos com os quais uma base de dados poderia ser integrada. A dificuldade objetiva na coleta de dados e fiscalização em relação a dados que devem ser fornecidos obrigatoriamente, aponta para necessidade de integração com o sistema público de administração e fiscalização, conforme apresentado no cap. 2 sobre políticas públicas.

É claro que uma integração dessa primeira proposta com outras ferramentas informáticas e bases de dados, sobre tudo em nível de órgãos e poder público, é altamente desejável. Nisso vemos o melhor cenário de desenvolvimento dessa pesquisa, dentro de um esforço conjunto, principalmente entre órgãos públicos (administrativos e de pesquisa) mas também privados, num esforço de mapear esse universo da biomassa residual que unanimemente é de grande potencial, porém bastante nebuloso ainda quanto a sua realidade distribuída, aos montantes localizados que compõem essa enorme quantidade de biomassa que hoje se destina em grande parte a lixões e aterros. Com grande desperdício de energia e prejuízo ambiental.

Colocamos todavia no ar esse sistema mesmo em sua forma protipal, acessível a todos os usuários e gerenciado pelo autor e seus colaboradores, em forma de teste ou modelo zero, ficando na observação sobre o retorno de dados dos usuários e eventualmente o interesse de outros operadores públicos e privados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEGAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO. (2016) *O gás natural em números*. Disponível em: <http://www.abegas.org.br/Site/?page_id=1158>. Acesso em 8 jun. 2016.

ABC-AMERICAN BIOGAS COUNCIL. (2016) *Biogas 101 handout new*. Disponível em: <<https://www.americanbiogascouncil.org/pdf/ABC%20Biogas%20101%20Handout%20NEW.pdf>>. Acesso em 7 de Jul. 2016.

ABIOGAS–ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. (2015) *PNBB, Programa Nacional de Biogas e Biometano*, Versão 1 Novembro 2015 69p. Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/e3a792_c21f5cd0d4fe4a0997ef62fd84d94806.pdf>. Acesso em 25 Dez. 2015.

AIMONI MARQUES, C. (2012) *Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogás como fonte primária de energia elétrica*. Dissertação de Mestrado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Programa de pós- graduação strictu sensu em energia na agricultura, Cascavél- PR, 2012.

ALMEIDA, D. MARQUES, M.F., (2016) *Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste*, Polímeros vol.26 no.1 São Carlos Jan./Feb. 2016 Epub Mar 04, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/2016nahead/0104-1428-po-0104-14282100.pdf>>. Acesso em Ago. 2016.

AMARAL MENEZES, R.A. GERLACH, J.L. MENEZES, M.A. (2000) *Estágio atual da incineração no brasil*. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública , Curitiba 2000. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso em 30 Ago. 2016

ABNT. (2004) *NBR 10004/2004, Classificação de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro.

ABRELPE. (2014) *Panorama de resíduos no Brasil*. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em 24 Ago. 2014.

ALLSLOP, M., COSTNER,P., JOHNSTON,P.(2001) *Incineration and human health - State of knowledge of the impacts of waste incinerators*. Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, UK. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/norway/Global/norway/p2/other/report/2001/incineration-and-human-health.pdf>>. Acesso em 23 Jul. 2016.

ANEEL. (2004) *Resolução Normativa 77/200*.

ANEEL. (2014) *Cadernos Temáticos Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica*, Brasília.

ANEEL. (2012) *Resolução Normativa 482*, Brasília.

ANEEL (2015) *Resolução Normativa 687*, Brasília.

ANEEL. (2017), *Geração Distribuída – Registro de micro e mini geradores distribuídos – Unidades consumidoras com geração distribuída*. Disponível em:
< <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 17 Jan. 2017.

ANP. (2015) *Resolução Normativa n.8 de 30 de Janeiro de 2015*.

APOLINÁRIO, S.M. (2004), *Tecnologias de gaseificação de biomassa*, 1º Seminário Sobre a Utilização de Energias Renováveis para Eletrificação Rural do Norte e Nordeste do Brasil, Brasília, 9 de Dez. 2004.

BARBOSA CORTEZ, L.A., SILVA LORA, E. E., OLIVARES GÓMEZ E. (organização) (2008) *Biomassa para energia*. Ed. Unicamp, 20008.

BARISANO, D., CANNETO, G. (2013) *Gassificazione: opportunità e limiti*, ENEA, Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo sostenibile – Bioenergie al 2020: la ricerca ENEA, Caresanablot (VC) 2013. Disponível em:
<http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/events/vercelli-expo/Forlener_27sett2013_Barisano_upgr.pdf>. Acesso em 18 Jun. 2016.

BARSKY R., KILIAN L. (2004) *Oil and the macroeconomy since the 1970s*, *Working Paper 10855*. Disponível em : <<http://www.nber.org/papers/w10855>>. Acesso em 23 Dez. 2015.

BASTO OLIVEIRA L., PINGUELLI ROSA L. (2003) *Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits*, *Energy Policy* 31, pagg. 1481–1491.

BRACCIO, G. (2012), *Le attività di ricerca ENEA sulla gassificazione e la bioraffineria*, ENEA, Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo sostenibile – Convegno: Biomasse per uso energetico, Totino, 2 de Jul. 2012

BRIDGWATER A.V. (2011) *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*, *Revista Science Direct*. Disponível em:
<<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC233/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1/Review%20of%20fast%20pyrolysis%202011.pdf>>. Acesso em 27 Jan. 2016.

CEPEL-CENTRO DE PESQUISA DA ENERGIA ELÉTRICA DA ELETROBRAS. (2000) *Atlas solarimétrico do Brasil*.

CETESB– COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2006) *Biogás- Pesquisas e projetos no Brasil*, São Paulo, 2006. CGEE- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. (2010) *Química verde no Brasil 2010-2030*, Brasília.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (2014), *Análise comparativa das diferentes tecnologias de carbonização e recuperação de subprodutos*, Nota Técnica referente à letra (B) do estudo técnico 2 do Termo de Referência do Contrato 49, do ano de 2013, entre CGEE e MDIC, para subsídios em: “Modernização da Produção do Carvão Vegetal”, Brasília. 2014.

CIB—CONSORZIO ITALIANO BIOGAS E GASSIFICAZIONE.(2016) *Biogasdoneright Anaerobic digestion and soil carbon sequestration a sustainable, low cost, reliable and win win BECC Solution*. Disponível em:

<<http://www.consorziobiogas.it/Content/public/attachments/527Biogasdoneright%20No%20VEC%20-%20LowRes.pdf>>. Acesso em 15 Jan. 2016.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. (2002) *Resolução 313/2002, Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais*.

COP 21. (2015) *Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática*, Paris.

CREMONEZ, P.A. ET AL. (2013) *Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos*. Revista brasileira de energias renováveis v. 2, p. 21-35, 2013. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/rber/article/download/33901/pdf_5>. Acesso em 4 Ago. 2016

CRESESB - CENTRO DE REFERENCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO BRITO. (2001) *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em 3 Dez. 2016.

CZERNIK, S. - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY.(2016) *Review of Fast Pyrolysis of Biomass*. Disponível em:

<<http://peopleforcleanmountains.com/wp-content/uploads/2013/04/Review-of-Fast-Pyrolysis-of-Biomass1.pdf>>. Acesso em 25 Jun. 2016.

DE BAERE, L., MATTHEEUWS, B. (2012) *Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe – Status, experience and prospects*. Em: Waste Management, Vol. 3: Recycling and Recovery – Thomé-Kozmiensky Karl J., Thiel S., p 517-526, Munchen.

DELL’ANTONIA, D., (2012) *Gassificazione e pirolisi delle biomasse*, Corso di Laurea magistrale in scienze e tecnologie agrarie, Università di Udine. Disponível em:

<http://bioenergyfvg.uniud.it/fileadmin/documenti/Corso_energie_rinnovabili/Gassificazione_e_pirolisi_della_biomassa.pdf>. Acesso em 12 Ago. 2016.

DEMOLL, R., (1927) *Betrachtungen über Produktionsberechnungen*. In: *Archiv für Hydrobiologie*. 18 (1927), p. 462, Munchen.

DIAS MAGALHÃES, F. (2017) *Sala Bioquímica – Intensivo 2017*. Disponível em: <<http://salabioquimica.blogspot.com.br/2014/06/fotossintese-fases-clara-e-escura.html>>. Acesso em 23 Mai. 2016.

EBA-EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION.(2015) *Biomethane & Biogas Report*. Disponível em: <<http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015/>>. Acesso em 7 Jul. 2016.

EMBRAPA AGROENERGIA (2012) *Notícias - Embrapa e ARS/USDA articulam parcerias na área de processos bioquímicos*. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1486877/embrapa-e-arsusda-articulam-parcerias-na-area-de-processos-bioquimicos>>. Acesso em 21 Jul. 2016.

ENTSOE-EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY, *ELECTRICITY IN EUROPE*. (2015). Disponível em: <https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/Statistics/electricity_in_europe/entsoe_electricity_in_europe_2015_web.pdf>. Acesso em 28 Fev. 2016.

EPE/MME. (2014a) *Estudos da Demanda de Energia - Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050*, Rio de Janeiro.

EPE/MME. (2014b) *Nota Técnica DEA 15/14, Inventário Energético de Resíduos Rurais*, Rio de Janeiro.

EPE/MME. (2014c) *Nota técnica DEA 18/14 - Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*, Rio de Janeiro.

FAGUNDES BARRETO, E.J. (Coordenador), RENDERO,G., NOGUEIRA, M. (2008) *Combustão e gasificação de biomassa sólida- Soluções energéticas para Amazônia*. MME- Programa Luz para todos, 2008.

FAO/GOVERNO DA FRANÇA. (2016a) *The 4 % Initiative*. Disponível em <<http://4p1000.org/>>. Acesso em 4 Fev. 2016.

FAO-CORPORATE DOCUMENTS REPOSITORY. (2016b), *The research progress of biomass pyrolysis processes*. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t4470e/t4470e0a.htm>>.Acesso em 10 Jul. 2015

FERNANDES, F, MOUTINHO DOS SANTOS, V. (2004) *Reflexões sobre a história da matriz energética brasileira e sua importância para a definição de novas estratégias para o gás*, IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2004/Trabalhos/RioOil&Gas-Flavio-Edmilson.pdf>>. Acesso em 5 Set. 2016.

FIORI CARDOSO, T.(2011) *Cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar: revisão de literatura*. Monografia de Mestrado da Universidade Federal de São Carlos- Centro de Ciências Agrárias - Programa de pós-graduação em gestão de produção sucroenergética, Sertãozinho,2011.

FONZAR GRANATO, E. (2003) *Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2003.

FORTUNATTO, A.C. (2014) *Alternativas para o aproveitamento do licor negro da indústria de papel e celulose*, Monografia para conclusão de curso USP- Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo.

FRANCESCATO, V. (2013) *Basi tecniche del syngas*, Trabalho técnico apresentado no 1 Congresso Info Syngas da AIEL, Associazione Italiana Energie Agroforestali, Montichiari (FI). Disponível em: <<http://www.gts-syngas.com/uploads/media/2.Francescato.pdf>>. Acesso em 28 Ago. 2016.

FS-UNEP - FRANKFURT SCHOOL AND UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, COLLABORATING CENTRE FOR CLIMATE AND SUSTAINABLE ENERGY FINANCE. (2015) *Global Trends in Renewable Energy Investment*. Disponível em: <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/attachments/key_findings.pdf> Acesso em 12 de Nov. de 2015.

GABRIEL W.(2010) *Metodologia de desenvolvimento, gestão de projetos e setor de TI*, Disponível em <<http://wgabriel.net/2010/01/11/metodologia-de-desenvolvimento-gestao-de-projetos-e-setor-de-ti/>>. Acesso em 2 Mai. 2016.

GOLDENBERG, J. (2009) *Biomassa e energia*. Química Nova, Vol. 32, No. 3, 582-587, 2009.

GOOGLE INC. (2016) *Google Maps APIs*. Disponível em <<https://developers.google.com/maps/?hl=pt-BR>>. Acesso em 24 Mai. 2016.

GSE - GESTORE SERVIZI ENERGETICI. (2014) *Rapporto Statistico – Energia da fonti rinnovabili*, Roma.

HAMILTON J.(2016) *Could Low Oil Prices Cause A Global Recession?*. Disponível em <<http://oilprice.com/Finance/the-Economy/Could-Low-Oil-Prices-Cause-A-Global-Recession.html>>. Acesso em 8 Fev. 2016.

HANSEN, J ET AL. (2008)*Target Atmospheric CO2: Where Should Humanity Aim?*, Columbia University Earth Institute, New York.

HARASEK, M. (2011) *Biogas carachteristics, clean-up technologies and upgrading*, Vienna University of Terchnology – Institute of Chemical Engineering, Viena.

HEFNER III, R.A. (2007) *The age of energy gases. China’s Opportunity for Global Energy Leadership*, The GHK Company Oklahoma City, Oklahoma, USA, 2007.

IBAMA-INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. (2015) Anexo I, Tabela de atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/cadastro-tecnico-federal-ctf>. Acesso em 28 Ago. 2016.

IBAMA-INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. (2012) *Instrução Normativa 13/2012, Lista Brasileira de Resíduos Sólidos*.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA.(2012) *Censo Agropecuário 2006*, Rio de Janeiro.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. (2015) *CNAE, Subclasses 2.2*.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA.(2014) *PAM-Pesquisa Agrícola Municipal*, Rio de Janeiro.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA.(2016) *LSPA-Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*, Rio de Janeiro.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2007) *Bioenergy Project Development & Biomass Supply – Good Practice Guideline*, Paris.

IEA–DALMAGO, G.A. ET AL. (2008) *Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola*, MAPA Documentos online n. 100. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do100.htm>. Acesso em 11 Fev. 2015.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013) *Resources to Reserves Oil, Gas and Coal Technologies for the Energy Markets of the Future*. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Resources2013.pdf>>. Acesso em 24 Set. 2015.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2016) *IEA Bioenergy Task 34 – Demoplants*, Base de Dados. Disponível em:< http://www.pyne.co.uk/?_id=156>. Acesso em 13 Jul. 2016.

IPEA-INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. (2012a) *Diagnostico de Resíduos Sólidos Urbanos – Relatório de Pesquisa*. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em 23 Fev. 2014.

IPEA-INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. (2012b) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais – Relatório de Pesquisa*, Brasília.

IPEA-INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. (2012c) *Relatório de Pesquisa-Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas*, Brasília.

KONINGSTEIN R., FORK D.(2014) *What It Would Really Take to Reverse Climate Change*. IEEE Spectrum.

Disponível em <<http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/what-it-would-really-take-to-reverse-climate-change>>. Acesso em 18 Nov. 2015.

LORA, E.S., ANDRADE, R.V. (2009) *Biomass as energy source in Brazil*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13., 777-788, 2009.

LORA, E.S., VENTURINI, E.J., (Coordenadores) (2012), *Biocombustíveis, Cap 6 Gaseificação e pirolise para conversão de biomassa em eletricidade e biocombustíveis*, Editora Interciência, São Paulo. Disponível em: <http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads_pt.html>. Acesso em 28 Jul.2016.

REICHERT, G.A. (2005), *Aplicação da biodigestão anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma revisão*, 23º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, Campo Grande (MS), 18 a 23 de Set.de 2005.

GRUPO LIGHT (2016) *Light ESCO*. Disponível em <<http://www.light.com.br/grupo-light/Empresas-do-Grupo/light-esco.aspx>>. Acesso em 06 Julho 2016.

MACÁRIO DO N. C.G, MONTEIRO BALDO S. (2005) *O modelo relacional*, trabalho produzido como parte da avaliação do curso MO-410, Introdução a Banco de Dados, Instituto de Computação da Unicamp, 2005.

MACORATTI.NET. (2016) *Banco de Dados: Introdução*. Disponível em: <<http://www.macoratti.net/banco.htm>>. Acesso em 18 Jun. 2016.

MAPA/EMBRAPA. (2008) *Documentos Online n.100 - Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola*. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do100.pdf>. Acesso em 20 Mar. 2015.

MARIADB FOUNDATION. (2016) *MariaDB Download*. Disponível em <<https://mariadb.org/download/>>. Acesso em 14 Abr. 2016.

MERLI DO AMARAL, F.L. (2004) *Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo 2004.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, PLANSAB. (2014) *Plano Nacional de Saneamento Básico*, Brasília.

MYSQL. (2016) *Download*, Disponível em <<https://www.mysql.com/>>. Acesso em 14 de Abr. 2016.

MARIANI L. (2015) *Levantamento de unidades de produção de biogás no Brasil para fins energéticos ou Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*, Workshop rede Biogásfert, Rio de Janeiro. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/documents/1355242/1529323/Biog%C3%A1sFert+3.pdf/22401089-2007-4ca2-bea5-25a932b2ea49>>. Acesso em 23 Fev. 2015.

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO. (2010) *Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia (conforme alla direttiva 2009/28/CE e alla decisione della Commissione del 30 giugno 2009)*, Roma. Disponível em: <http://www.ebb-eu.org/legis/ActionPlanDirective2009_28/national_renewable_energy_action_plan_italy_it.pdf>. Acesso em 12 Jan. 2016.

MMA–MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2012) *PNRS Plano Nacional de Resíduos Sólidos*, Brasília. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657>. Acesso em 12 Nov. 2014.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2015) *Resenha Energética Brasileira-Exercício 2014*, Brasília.

MME/EPE. (2012) *BEN- Balanço Energético Nacional 2012*, Rio de Janeiro, EPE.

MME/EPE. (2013) *BEN- Balanço Energético Nacional 2013*, Rio de Janeiro, EPE.

MME/EPE. (2014) *BEN- Balanço Energético Nacional 2014*, Rio de Janeiro, EPE.

MME/EPE. (2015) *BEN- Balanço Energético Nacional 2015*, Rio de Janeiro, EPE.

MORAES FALLEIRO de A., HUBNER A., CARMO CAUDURO GASTALDINI do M. (2014) *Projetos de energia renovável localizados no Brasil registrados no primeiro e no segundo período do protocolo de Quioto*, IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 19-21 Dez 2014, Porto Alegre (RS).

OLIVEIRA ALCANTARA A. J. DE. (2010) *Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos e caracterização química do solo da área de disposição final do município de Cáceres-MT*, Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres.

ONDEI, V. (2012) *A nova energia do eucalipto*, Revista Dinheiro Rural, Edição 97, Nov. 2012. Disponível em < <http://dinheiro rural.com.br/secao/agrotecnologia/nova-energia-do-eucalipto>>. Acesso em 23 Jul. 2016.

PALMER R., COLTON J. , KRAMER L (2014) *A history of Modern world*, McGraw and Hill.

PEDROZA M.M. ET AL. (2010) *Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão*, Revista Liberato, Nova Hamburgo, 2010.

PLAZA PINTO, C. (1999) *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Campinas, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE - SECRETARIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. (2004) *Caracterização dos resíduos sólidos de Belo Horizonte*. Disponível em: <<http://www.blogdocancado.com/wp-content/uploads/2011/02/RELAT-CARACTERIZACAO-RESIDUOS-2004-BH.pdf>>. Acesso em 19 Ago. 2015.

PRETO, R. (2010) *Biomasse e pianificazione del territorio: lo sviluppo di filiere per l'utilizzo con tecnologie innovative per la produzione di energia*, Tese de Doutorado, UNIPV- Università degli Studi di Pavia, 2010.

PROBIOGAS - PROJETO BRASIL ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS (2010) *Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização*, 5ª Edição, Gülzow, 2010. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf>. Acesso em 12 Mar. 2015.

ROCHA, J. D.; MESA PÉREZ, J. M. e CORTEZ, L. A. B. (2004) *Aspectos Teóricos e práticos do Processo de Pirólise de Biomassa*. Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Álcool”, UNIFEI, Itajubá 2004. Disponível em: <http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/curso_cyted/files/pdf/Tema%20%20%20Processos%20e%20Tecnologias%20para%20a%20Conversao%20do%20Bagaco%20em%20Energia%20e%20Combustiveis/Pirolise.pdf>. Acesso em 15 Jun. 2016.

ROCHA DA COSTA E. (2011) *Bancos de Dados relacionais*, trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Tecnologia, São Paulo.

ROCHA J.D., MESA PÉREZ., J.M., CORTEZ, L.A.B. (2004) *Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa*, Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Álcool” UNIFEI, Itajubá.

RODRIGUES, L. G. S. (2005) *Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado apresentada a FEIS/UNESP. Ilha Solteira – SP, p. 70 – 103, 2005.

SADIA/USP. (2006) *Programa 3S para suinocultura sustentável*. Disponível em: <http://www.usp.br/mudarfuturo/apresentacoes/USP3s_Apres.ppt>. Acesso em 23 Jun. 2015.

SANTOS, E. M., CARRERA G., DONDERO L., FAGÁ M. (2002) *Gás Natural, Estratégias para uma energia nova no Brasil*. São Paulo, AnnaBlume, 2002.

SEABRA, J. E. A.. (2008) *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*, Tese de doutorado, FEM/Unicamp, Campinas.

SENADO FEDERAL–REVISTA EM DISCUSSÃO. (2010) *Edição de Abril 2010. p. 11-17*. Disponível em:

<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201001%20-%20abril/pdf/em%20discuss%C3%A3o!_abril_internet.pdf>. Acesso em: 13 Mai. 2016.

SILVA LORA, E.E. ET AL. (2015) *Gaseificação e pirólise para conversão de biomassa em eletricidade e biocombustíveis*. Cap. 6 do Livro Biocombustíveis, Ed Interciência, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:

<<http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/BiocombustiveisCap06.pdf>>. Acesso em 10 Jul. 2016.

TERNA GROUP/SISTAN.(2014) *Dati Statistici sull'Energia Elettrica in Italia*.

Disponível em :

<<https://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/statisticheeprevisioni/datistatistici.aspx>>.

Acesso em 23 Mar. 2016.

TEXEIRA COELHO, S. ET AL. (2006) *A conversão da fonte renovável biogás em energia*, Trabalho apresentado no V Congresso de Planejamento Energético em Brasília, Junho de 2006.

UMWELT BUNDESAMT.(2015) *Environmental Trends in Germany-Data on the Environment*. Disponível em:

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/data_on_the_environment_2015.pdf>. Acesso em 02 Out. 2015.

UN/FCCC COP 21. (2015) *Adoption of the Paris Agreement*.

VERNADSKI V.I.(1997) *La Biosfera*, Fundacion Argentaria, Madrid.

WOESE C.R, KANDLER O., WHEELIS M.L.(1990) *Toward a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria and Eukarya (Euryarchaeota/Crenarchaeota*, Proceedings of National Academy of Sciences, USA Vol.87, pp. 4576-4579.

ZANETTE, A.L., (2009) *Potencial de aproveitamento energético do biogás no brasil*. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.

ANEXO

RELAÇÃO: RESÍDUOS ORGÂNICOS - TUPLAS E ATRIBUTOS ANALÍTICOS						
Código Database	Código ABNT-NBR	Código IBAMA (1)	Código CNAE	Código CTF/APP (2)	CATEGORIA	Resíduo
01					Origem animal	
		02 01			Dejetos animais	
		02 01 01			Dejetos Avícolas (incluindo palha) colhidos separadamente e tratados noutro local	
		02 01 01			Dejetos Bovinos (incluindo palha) colhidos separadamente e tratados noutro local	
		02 01 01			Dejetos Ovinos (incluindo palha) colhidos separadamente e tratados noutro local	
		02 01 01			Dejetos Suínos (incluindo palha) colhidos separadamente e tratados noutro local	
		02 02			Lodos de tratamento de efluentes industriais	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Carne avícola	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Carne bovina	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Carne ovina	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Carne suína	
		02 05 02			Lodo de tratamento local de efluentes - Laticínios	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Ovos	
		02 02 04			Lodo de tratamento local de efluentes - Crustáceos e Peixes	
		02 03			Lodos de lavagens de estabelecimentos	
		02 01 01			Aquicultura (tanques, etc.)	
		02 01 01			Caça e pesca (processamento mínimo)	
		02 01 06			Limpeza de locais de avicultura intensiva	
		02 01 06			Limpeza de locais de ovinocultura intensiva	
		02 01 06			Limpeza de locais de pecuária intensiva	
		02 01 06			Limpeza de locais de suinocultura intensiva	
		02 02 01			Estabelecimentos de processamento carne avícola	
		02 02 01			Estabelecimento de processamento carne bovina	
		02 02 01			Estabelecimento de processamento carne ovina	
		02 02 01			Estabelecimento de processamento carne suína	
		02 02			Processamentos industriais	
		02 02 03			Carne avícola - matadouro(sebo,osso, soro,sangue,etc.)	
		02 02 03			Carne bovina - matadouro(sebo,osso, soro,sangue,etc.)	
		02 02 03			Carne ovina - matadouro(sebo,osso, soro,sangue,etc.)	
		02 02 03			Carne suína -matadouro(sebo,osso, soro,sangue,etc.)	
		02 02 03			Produção de carne tratada, enlatados e embutidos	
		02 02 03			Ovos	
		02 02 03			Crustáceos e peixe	
		02 01 02			Tecidos animais	
		02 05 01			Indústria de laticínios: queijo, requeijão e manteiga (soros de leite, etc.)	
		04 01			Indústria do couro	
		04 01 01			Resíduos da descarna e divisão de tripas	
		04 01 99			Resíduos e aparas de peles verdes ou salgadas antes do tratamento ao cromo	
02					Origem vegetal	
		02			Lodos de tratamento de efluentes industriais	
		02 07 05			Indústria cervejeira	
		02 01 03			Indústria confeitaria	
		02 07 05			Indústria de refrigerantes	
		02 07 05			Indústria de vinhos	
		02			Lodos de lavagens de estabelecimentos	
		02 01 01			Agricultura (silos e plantas de preparo e/ou transformação)	
		02 01 01			Horticultura e frutas (serras e processamento mínimo)	
		02 07 01			Limpeza e redução mecânica das matérias-primas indústria cervejeira	
		02 07 01			Limpeza e redução mecânica das matérias-primas indústria vinhos	
		02 07 01			Limpeza e redução mecânica das matérias-primas indústria refrigerantes	
		02 03			Processamentos industriais	
		02 03 04			Conservas, polpa de frutas e geleias	
		02 03 04			Leveduras e fermentos e extratos de leveduras e fermentos	
		02 03 04			Fubá (milho ou arroz)	
		02 03 04			Farinha de mandioca, tapioca e goma	
		02 03 04			Rapadura	
		02 01 03			Tecidos vegetais	
		02 01			Produção silvícolas e floricultura	
		02 01 99			Resíduos do floricultura, plantas ornamentais e medicinais (pétalas, caules, raízes e folhas)	
		02 01 99			Resíduos silvícolas (ligno-celulósicos)	
		03 01			Indústria madeireira	
		03 01 01			Resíduos do descasque	
		03 01 05			Cepilho	
		03 01 05			Lenha	
		03 01 05			Serragem	
		02			Processamento de Frutas e Hortalças (incluindo sucos)	
		02 03 04			Abacate (intensivo)	
		02 03 04			Abacaxi (intensivo)	
		02 01 03			Abobrinha (intensivo)	
		02 03 04			Açaí (intensivo)	
		02 03 04			Acerola (intensivo)	
		02 03 04			Agave sisal (intensivo)	
		02 01 03			Agrião (intensivo)	
		02 01 03			Alface (intensivo)	
		02 03 04			Algodão herbáceo (intensivo)	
		02 03 04			Ameixa (intensivo)	
		02 03 04			Amora (intensivo)	
		02 03 04			Azeitonas	
		02 03 04			Babaçu (intensivo)	
		02 03 04			Banana (intensivo)	
		02 03 04			Batata baroa (intensivo)	
		02 03 04			Batata doce (intensivo)	
		02 01 03			Beringela (intensivo)	
		02 03 04			Beterraba (intensivo)	
		02 01 03			Brócolis (intensivo)	
		02 03 04			Cacau (intensivo)	
		02 03 04			Café (intensivo)	
		02 03 04			Cajú (intensivo)	
		02 03 04			Caqui (intensivo)	
		02 03 04			Carambola (intensivo)	
		02 03 04			Carneíra (intensivo)	
		02 03 04			Castanha de cajú	
		02 03 04			Castanha do Pará (intensivo)	
		02 01 03			Cebolinha (intensivo)	
		02 01 03			Camomila (intensivo)	
		02 01 03			Chuchu (processamento intensivo)	
		02 03 04			Coco-da-baía (processamento intensivo)	
		02 01 03			Couve e couve-flor (processamento intensivo)	
		02 01 03			Cuentro e salsa (processamento intensivo)	
		02 03 04			Cupuaçu (processamento intensivo)	
		02 03 04			Dendê	
		02 01 03			Espinafre (processamento intensivo)	
		02 03 04			Figo (processamento intensivo)	
		02 03 04			Framboesa (processamento intensivo)	
		02 03 04			Fruta-do-conde (processamento intensivo)	
		02 03 04			Goiaba (processamento intensivo)	
		02 03 04			Guaraná (semente)	
		02 03 04			Inhamé (processamento intensivo)	
		02 03 04			Jabuticaba (processamento intensivo)	

		02 03 04			Jaca (processamento intensivo)
		02 01 03			Jiló (processamento intensivo)
		02 03 04			Kiwi (processamento intensivo)
		02 03 04			Laranjas (processamento intensivo)
		02 03 04			Limão (processamento intensivo)
		02 03 04			Maça (processamento intensivo)
		02 03 04			Manga (processamento intensivo)
		02 03 04			Maracujá (processamento intensivo)
		02 03 04			Marmelo (intensivo)
		02 03 04			Maxixe (processamento intensivo)
		02 03 04			Melancia (processamento intensivo)
		02 03 04			Melão (processamento intensivo)
		02 03 04			Milho verde (processamento intensivo)
		02 03 04			Morango (processamento intensivo)
		02 03 04			Nabo (processamento intensivo)
		02 03 04			Palmito (processamento intensivo)
		02 01 03			Pepino (processamento intensivo)
		02 03 04			Pera (processamento intensivo)
		02 03 04			Pessegueiro (processamento intensivo)
		02 01 03			Pimenta e pimentão (intensivo)
		02 03 04			Pinhão manso (intensivo)
		02 01 03			Quiabo (intensivo)
		02 01 03			Rabanete (intensivo)
		02 01 03			Repólho (intensivo)
		02 03 04			Tangerina (intensivo)
		02 01 03			Tomate estaquiado (intensivo)
		02 03 04			Tungue (torta)
		02 03 04			Uva de mesa (processamento mínimo)
		02 03 04			Uva para vinho/suco
		02 01 03			Vagem (feijão vagem) (intensivo)
		02			Processamento de cereais, grãos, legumes, etc. (lavouras temporárias)
		02 03 04			Algodão herbáceo
		02 03 04			Amendoim em casca
		02 03 04			Arroz (casca e farelo)
		02 03 04			Avêla
		02 03 04			Batata inglesa (intensivo)
		02 03 04			Cacau
		02 03 04			Café
		02 03 04			Cana de açúcar (bagaço)
		02 03 04			Cana de açúcar (vinhoto)
		02 01 03			Cebola (intensivo)
		02 03 04			Centéio
		02 03 04			Cevada
		02 03 04			Cha
		02 01 03			Ervilha
		02 01 03			Fava
		02 03 04			Feijão preto, de cor, fradinho, etc.
		02 03 04			Fumo em folhas
		02 03 04			Girassol (semente)
		02 03 04			Linhaça
		02 03 04			Mamona
		02 03 04			Mandioca (incluido ramas residuais)
		02 03 04			Milho em grão (incluido folhas, caules e sabugo)
		02 03 04			Óleos alimentares
		02 03 04			Soja em grão
		02 03 04			Sorgo em grão
		02 03 04			Tabaco
		02 01 03			Tomate rasteiro (industrial)
		02 03 04			Trigo em grão
		02 03 04			Triticale
		02			Indústria doceira
		02 04 99			Industria doceira (bolas, pirulitos, chicletes, etc.)
		02 03 04			Preparação e fermentação de melaços
		02 06			Indústria confeliteria
		02 06 01			Industria confeliteria (tortas, bolos, pães, etc)
		02 07			Indústria de bebidas (excluido cha, café e cacau)
		02 07 04			Industria cervejeira (orgânicos sólidos)
		02 07 04			Industria de refrigerantes (orgânicos sólidos)
		02 07 04			Industria de sucos de frutas (incluido cítricos)
		02 07 04			Industria de vinhos (orgânicos sólidos)
03					Resíduos urbanos e saneamento
		19 08			Resíduos ETE e ETRAs
		19 08 01			Fase de gradeamento em ETEs e ETRAs
		19 08 09			Gorduras e óleos, da separação óleo/água, contendo apenas óleos e gorduras alimentares
		19 08 05			Lodos de tratamentos de efluentes urbanos (dejetos humanos etc.)
		20 01			RSU e FORSU
		20 01 08			Resíduos biodegradáveis de cozinhas e cantinas
		20 01 99			F.O.R.S.U. Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (coleta seletiva)
		20 01 99			F.O.R.S.U. Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (separada mecanicamente)
		20 01 25			Óleos e gorduras alimentares
		20 01 00			R.S.U. Resíduos Sólidos Urbanos (brutos)
		20			Limpeza urbana e saneamento
		20 03 04			Lodos de fossas sépticas
		20 03 02			Mercados públicos, hortofrutícolas, feiras e CEASAs (resíduos biodegradáveis)
		20 02 01			Varrição de logradouros e vias públicas (resíduos biodegradáveis)
4					Outros (10)
		sem código			Ensilados de gramíneas e forrageiras
		sem código			Ensilados de grãos e cereais (milho;soja. Trigo etc.)
		07 07 99			Glicerina (glicerol) bruta
		07 07 99			Glicerina refinada
		sem código			Gramíneas e forrageiras frescas
		sem código			Palha e feno secos de gramíneas e forrageiras
		07 07 99			Resíduos da produção de ácidos orgânicos